COMPÊNDIO TÉCNICO PARA FORMAÇÃO PROFISSIONAL

PROJETO ELÉTRICO INDUSTRIAL BÁSICO

Fundamentos, dimensionamento e documentação técnica

Sergio Cordero Calvimontes

EDITORA ARGUS KEPHEUS
2026 • 1ª Edição

Projeto elétrico industrial básico

Fundamentos, dimensionamento e documentação técnica

Sergio Cordero Calvimontes

1ª Edição

Editora Argus Kepheus

2026

Projeto elétrico industrial básico
Fundamentos, dimensionamento e documentação técnica
Sergio Cordero Calvimontes

Direitos autorais © 2026 Editora Argus Kepheus
Todos os direitos reservados

ISBN: 978-65-976344-0-8
Edição: 1ª Edição

Editora Argus Kepheus
Parque Mambucaba
Angra dos Reis, Rio de Janeiro, 23950-000
Brasil
www.arguskepheus.com
contato@arguskepheus.com

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Calvimontes, Sergio Cordero
Projeto elétrico industrial básico [livro eletrônico] : fundamentos, dimensionamento e documentação técnica / Sergio Cordero Calvimontes. -- Angra dos Reis, RJ : Argus Kepheus, 2026. -- (Compêndio técnico para formação profissional)
PDF

Bibliografia.
ISBN 978-65-976344-0-8

1. Circuitos elétricos 2. Eletrotécnica 3. Engenharia elétrica 4. Indústria 5. Instalações elétricas I. Título. II. Série.

26-370767.0 CDD-621.3192

Índices para catálogo sistemático:

1. Projetos elétricos industriais : Eletrotécnica : Engenharia elétrica 621.3192

Aline Graziele Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

Este conteúdo é licenciado sob a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0). Qualquer parte desta publicação pode ser copiada, distribuída, compartilhada ou adaptada, por qualquer meio ou formato, desde que seja feita a devida atribuição de crédito, citando expressamente a fonte e a referência a este livro.

Sumário

I Fundamentos aplicados **1**

1 Introdução ao projeto elétrico **2**

1.1 Introdução . . . 2

1.2 Desenvolvimento teórico . . . 2

1.2.1 Definição e importância do projeto . . . 2

1.2.2 Etapas de elaboração do projeto . . . 4

1.2.3 Classificação das cargas industriais . . . 6

1.2.4 Estrutura de uma instalação elétrica industrial . . . 7

1.3 Resumo do capítulo . . . 10

2 Grandezas elétricas e potência **11**

2.1 Introdução . . . 11

2.2 Grandezas elétricas fundamentais . . . 11

2.2.1 Diferença de potencial elétrico . . . 12

2.2.2 Corrente elétrica . . . 13

2.2.3 Potência elétrica . . . 14

2.3 Potência em corrente alternada . . . 14

2.3.1 Fator de potência . . . 15

2.3.2 Interpretação física do fator de potência . . . 16

2.4 Potência em sistemas polifásicos e trifásicos . . . 16

2.4.1 Outras grandezas relevantes . . . 18

2.5 Resumo do capítulo . . . 19

3 Sistemas monofásicos e trifásicos **20**

3.1 Introdução . . . 20

3.2 Desenvolvimento teórico . . . 20

3.2.1 Sistemas monofásicos . . . 22

3.2.2 Sistemas trifásicos . . . 23

3.2.3 Relações entre tensões de linha e de fase . . . 24

3.2.4 Relações de corrente . . . 25

3.2.5 Configurações de conexão . . . 26

3.3 Resumo do capítulo . . . 28

4 Cálculo de corrente elétrica **29**

4.1 Introdução . . . 29

4.2 Desenvolvimento teórico . . . 29

4.2.1 Valor eficaz (RMS) . . . 30

4.2.2 Relação entre corrente e aquecimento . . . 31

4.2.3 Cálculo de corrente em sistemas monofásicos . . . 32

4.2.4 Cálculo de corrente em sistemas trifásicos . . . 32

4.2.5 Corrente de partida . . . 33

4.3 Resumo do capítulo . . . 34

5 Cargas industriais e motores elétricos 35

5.1 Introdução . . . 35
5.2 Desenvolvimento teórico . . . 35
5.2.1 Classificação das cargas industriais . . . 36
5.2.2 Motor de indução trifásico . . . 38
5.2.3 Interpretação da placa de identificação . . . 40
5.2.4 Derivação da corrente elétrica do motor . . . 41
5.2.5 Potência aparente do motor . . . 41
5.2.6 Corrente de partida . . . 43
5.3 Resumo do capítulo . . . 45

6 Proteção e aterramento 46

6.1 Introdução . . . 46
6.2 Fundamentos da proteção elétrica . . . 46
6.3 Disjuntores termomagnéticos . . . 48
6.3.1 Proteção térmica . . . 48
6.3.2 Proteção magnética . . . 48
6.3.3 Critério de dimensionamento . . . 49
6.3.4 Curvas de disparo . . . 50
6.4 Dispositivo diferencial-residual . . . 51
6.5 Seletividade de proteção . . . 53
6.6 Fundamentos do aterramento . . . 54
6.6.1 Equipotencialização . . . 55
6.7 Esquemas de aterramento . . . 56
6.8 Resumo do capítulo . . . 60

II Organização da instalação e cálculo de demanda 61

7 Interpretação de planta e organização do projeto 62

7.1 Introdução . . . 62
7.2 Desenvolvimento teórico . . . 62
7.2.1 Integração da planta às etapas do projeto . . . 63
7.2.2 Leitura e interpretação da planta baixa . . . 63
7.2.3 Simbologia e convenções técnicas . . . 65
7.2.4 Organização espacial do projeto . . . 66
7.3 Resumo do capítulo . . . 68

8 Levantamento de cargas 69

8.1 Introdução . . . 69
8.2 Desenvolvimento teórico . . . 69
8.2.1 Identificação das cargas . . . 70
8.2.2 Dados mínimos do levantamento . . . 71
8.2.3 Exemplo de levantamento de cargas . . . 72
8.2.4 Potência instalada e organização das potências . . . 73
8.2.5 Fator de uso e potência demandada . . . 74
8.2.6 Estrutura mínima da tabela de levantamento . . . 75

8.3 Resumo do capítulo . . . 77

9 Quadro de cargas **78**
9.1 Introdução . . . 78
9.2 Desenvolvimento teórico . . . 78
9.2.1 Agrupamento funcional dos circuitos . . . 79
9.2.2 Campos essenciais do quadro de cargas . . . 80
9.2.3 Estrutura tabular do quadro de cargas . . . 81
9.2.4 Balanceamento de fases . . . 84
9.2.5 Rastreabilidade e revisão do quadro . . . 86
9.2.6 Relação com demanda e dimensionamento . . . 87
9.2.7 Reserva de capacidade . . . 87
9.2.8 Conferência final do quadro de cargas . . . 89
9.3 Resumo do capítulo . . . 89

10 Cálculo de demanda **90**
10.1 Introdução . . . 90
10.2 Desenvolvimento teórico . . . 90
10.2.1 Demanda e fator de demanda . . . 92
10.2.2 Fator de utilização . . . 96
10.2.3 Fator de simultaneidade . . . 97
10.2.4 Fator de serviço . . . 101
10.2.5 Fator de diversidade . . . 103
10.2.6 Demanda equivalente . . . 105
10.2.7 Cálculo de demanda total . . . 106
10.3 Resumo do capítulo . . . 109

III Dimensionamento e documentação técnica **110**

11 Dimensionamento de condutores **111**
11.1 Introdução . . . 111
11.2 Desenvolvimento teórico . . . 112
11.2.1 Corrente de projeto . . . 113
11.2.2 Critério da capacidade de condução de corrente . . . 114
11.2.3 Fatores de correção . . . 115
11.2.4 Coordenação com dispositivos de proteção . . . 121
11.2.5 Critério da queda de potencial elétrico . . . 123
11.2.6 Seções mínimas dos condutores . . . 127
11.2.7 Condutor de proteção **PE** . . . 128
11.2.8 Procedimento de dimensionamento . . . 129
11.3 Resumo do capítulo . . . 131

12 Verificação de condutores e dispositivos de proteção **132**
12.1 Introdução . . . 132
12.2 Desenvolvimento teórico . . . 132
12.2.1 Método de instalação . . . 133
12.2.2 Capacidade de condução tabelada . . . 135
12.2.3 Capacidade de interrupção e curto-circuito . . . 136
12.2.4 Escolha da curva de disparo . . . 138

12.2.5 Procedimento de verificação . . . 139
12.2.6 Interpretação da tabela de verificação . . . 141
12.2.7 Procedimento resumido de decisão . . . 141
12.3 Resumo do capítulo . . . 142

13 Diagrama unifilar **143**
13.1 Introdução . . . 143
13.2 Desenvolvimento teórico . . . 144
13.2.1 Conceito e função do diagrama unifilar . . . 144
13.2.2 Informações mínimas do diagrama . . . 145
13.2.3 Símbolos e elementos principais . . . 146
13.2.4 Relação com o quadro de cargas . . . 147
13.2.5 Projeto-base de quadro de cargas industrial . . . 149
13.2.6 Representação de motores . . . 152
13.2.7 Checklist de revisão do diagrama unifilar . . . 153
13.3 Resumo do capítulo . . . 154

14 Diagrama multifilar e balanceamento **155**
14.1 Introdução . . . 155
14.2 Desenvolvimento teórico . . . 156
14.2.1 Do unifilar ao multifilar . . . 156
14.2.2 Leitura dos condutores no diagrama multifilar . . . 156
14.2.3 Relação com o quadro de cargas e com o diagrama unifilar . . . 157
14.2.4 Balanceamento como conferência gráfica . . . 157
14.2.5 Neutro, desequilíbrio e cargas não lineares . . . 158
14.2.6 Versão multifilar do exemplo residencial . . . 158
14.2.7 Versão multifilar do exemplo industrial . . . 160
14.2.8 Procedimento de revisão do diagrama multifilar . . . 162
14.3 Resumo do capítulo . . . 163

15 Ferramentas computacionais aplicadas **164**
15.1 Introdução . . . 164
15.2 Desenvolvimento teórico . . . 165
15.2.1 O papel das ferramentas no projeto . . . 165
15.2.2 Categorias de ferramentas . . . 165
15.2.3 Inteligência artificial e design generativo . . . 167
15.2.4 Critérios para escolher a ferramenta . . . 167
15.2.5 Indicações por contexto de uso . . . 168
15.2.6 Fluxo mínimo de trabalho digital . . . 169
15.2.7 Interoperabilidade, arquivos abertos e versionamento . . . 169
15.2.8 Automação e scripts . . . 170
15.2.9 Boas práticas e tendências . . . 170
15.3 Resumo do capítulo . . . 170

Referências **171**

Parte I

Fundamentos aplicados

Capítulo 1

Introdução ao projeto elétrico

1.1 Introdução

O desenvolvimento de instalações industriais fundamenta-se na elaboração de projetos elétricos rigorosos, os quais compõem o acervo técnico responsável por orientar todas as etapas de implementação, integração interdisciplinar, operação e manutenção de sistemas de potência elétrica (Crespo, 2015; IEEE, 2007). O projeto elétrico deve ser concebido de forma a favorecer a continuidade de serviço compatível com a finalidade da instalação, a segurança das pessoas, a integridade dos equipamentos e a eficiência energética do sistema.

Nota

Contexto de aplicação: Os conceitos apresentados neste capítulo constituem a base para o desenvolvimento de projetos elétricos em diferentes níveis de complexidade, incluindo sistemas prediais, comerciais, industriais e de automação.

O objetivo deste capítulo consiste em contextualizar o projeto elétrico nos ambientes predial e industrial, estabelecendo definições fundamentais, critérios básicos de concepção e a relevância do cumprimento das normas técnicas vigentes (ABNT NBR 5410, 2004; NR-10, 2004). Pretende-se fornecer ao discente uma base conceitual sólida que permita identificar a estrutura geral de uma instalação elétrica, compreender as etapas do processo de projeto e reconhecer a importância da classificação preliminar das cargas que a compõem.

1.2 Desenvolvimento teórico

Um projeto elétrico é o **o conjunto sistematizado de informações técnicas que inclui cálculos, desenhos, especificações e critérios de seleção de equipamentos, com o objetivo de assegurar o fornecimento de energia elétrica de forma segura, confiável e economicamente viável** (Chapman, 2012). No contexto industrial, a complexidade desse processo é ampliada pela presença de cargas de maior potência, pela necessidade de continuidade do serviço, pela interação entre diferentes subsistemas elétricos e pela maior exigência de documentação técnica.

1.2.1 Definição e importância do projeto

A elaboração de um projeto elétrico não se restringe à representação gráfica de circuitos, configurando-se como um processo estruturado de tomada de decisão técnica. Nesse processo, deve-se garantir que todos os componentes do sistema, desde o ponto de entrega da concessionária até os equipamentos finais, estejam devidamente especificados, dimensionados e projetados para suportar as solicitações elétricas, térmicas e mecânicas, tanto em regime permanente quanto em condições transitórias impostas pela operação da instalação (Crespo, 2015).

Definição

Projeto elétrico predial: Define-se como o planejamento técnico destinado a edificações residenciais ou comerciais de baixa tensão, visando o conforto, a segurança e a funcionalidade dos usuários. Quando aplicável, em interface com normas específicas, abrange o dimensionamento de circuitos de iluminação, tomadas e sistemas auxiliares, como interfonia, comunicação, automação e segurança, priorizando a conformidade normativa e a facilidade de manutenção.

Definição

Projeto elétrico industrial: Define-se como o conjunto de documentos técnicos destinado a instalações de maior complexidade, geralmente associadas a processos produtivos, sistemas motrizes, cargas de maior porte e exigência de continuidade operacional. Compreende o dimensionamento de quadros, centros de controle de motores, subestações, sistemas de correção de fator de potência, dispositivos de proteção, sistemas de aterramento e infraestrutura de distribuição, com foco na segurança, robustez, continuidade do serviço e eficiência energética.

Em geral, do ponto de vista funcional, um projeto elétrico deve atender simultaneamente aos seguintes critérios:

- **Segurança**: prevenção de choques elétricos, incêndios, sobreaquecimentos e falhas catastróficas;
- **Confiabilidade**: garantia de continuidade de fornecimento de energia dentro das condições previstas de operação;
- **Eficiência**: redução de perdas elétricas, melhor aproveitamento energético e escolha adequada de equipamentos;
- **Manutenibilidade**: facilidade de inspeção, operação, substituição de componentes e manutenção dos sistemas.

No Brasil, a elaboração de projetos elétricos, conforme o nível de tensão e o tipo de instalação, deve obedecer às prescrições estabelecidas pela **ABNT NBR 5410** (ABNT NBR 5410, 2004), aplicável às instalações de baixa tensão, e pela **ABNT NBR 14039** (ABNT NBR 14039, 2005), referente às instalações de média tensão. Adicionalmente, as diretrizes de segurança do trabalho definidas pela **NR-10** (NR-10, 2004) devem ser observadas.

Além dessas referências fundamentais, o projetista deve considerar, conforme a natureza e as características específicas da instalação, outras normas técnicas e normativas complementares. A proteção contra descargas atmosféricas deve ser analisada segundo a série **ABNT NBR 5419**, que trata dos princípios gerais, do gerenciamento de risco, da proteção física das estruturas e da proteção dos sistemas elétricos e eletrônicos internos (ABNT NBR 5419-1, 2026; ABNT NBR 5419-2, 2026; ABNT NBR 5419-3, 2026; ABNT NBR 5419-4, 2026). Em edificações e áreas industriais, também podem ser relevantes a **ABNT NBR 10898**, para sistemas de iluminação de emergência (ABNT NBR 10898, 2023), e a **ABNT NBR ISO/CIE 8995-1**, para critérios de iluminação em ambientes de trabalho internos (ABNT NBR ISO/CIE 8995-1, 2013). Para instalações em locais especiais, destacam-se a **ABNT NBR 13570**, aplicável a locais de afluência de público (ABNT NBR 13570, 2021), e a **ABNT NBR 13534**, voltada a estabelecimentos assistenciais de saúde (ABNT NBR 13534, 2008).

No caso de quadros, painéis e dispositivos de proteção, devem ser avaliadas normas como a **ABNT NBR IEC 61439-1** e a **ABNT NBR IEC 61439-2**, relativas aos conjuntos de manobra e comando de baixa tensão (ABNT NBR IEC 61439-1, 2016; ABNT NBR IEC 61439-2, 2016), bem como a **ABNT NBR IEC 60947-2**, aplicável a disjuntores de baixa tensão (ABNT NBR IEC 60947-2, 2013). Para sistemas de aterramento e estudos associados, são importantes a **ABNT NBR 7117**, referente à medição da resistividade e à estratificação do solo, a **ABNT NBR 15749**, relativa à medição de resistência de aterramento e potenciais na superfície do solo, e a **ABNT NBR 15751**, aplicável a sistemas de aterramento de subestações (ABNT NBR 7117, 2020; ABNT NBR 15749, 2009; ABNT NBR 15751, 2013). Em ambientes sujeitos a atmosferas explosivas, a seleção e montagem das instalações elétricas devem observar a **ABNT NBR IEC 60079-14** (ABNT NBR IEC 60079-14, 2016). Por fim, instalações com geração fotovoltaica e infraestrutura de eletromobilidade podem exigir a aplicação da **ABNT NBR 16690**, da **ABNT NBR 16274**, da **ABNT NBR 17019** e da **ABNT NBR IEC 61851-1** (**abnt 70** ; **abntnbriec6** **-** ; ABNT NBR 16690, 2019; ABNT NBR 16274, 2014).

Nota

Normativa nacional: ABNT: A Associação Brasileira de Normas Técnicas é o órgão nacional responsável pela normalização técnica no Brasil. Trata-se de uma entidade privada, sem fins lucrativos, que atua na elaboração das normas técnicas brasileiras e representa o país em organismos internacionais.

NBR: A Norma Brasileira é um documento técnico aprovado pela ABNT que estabelece regras, requisitos e métodos para produtos, serviços, processos e atividades. Uma "ABNT NBR" orienta critérios mínimos de segurança, desempenho, qualidade e padronização, servindo como referência técnica para projeto, execução, inspeção e manutenção.

Saiba Mais

Normativa internacional: IEC: A *International Electrotechnical Commission* é o organismo internacional responsável pela normalização nas áreas elétrica, eletrônica e tecnologias relacionadas. Muitas normas brasileiras incorporam ou adaptam documentos IEC, especialmente em equipamentos, proteção, ensaios e sistemas elétricos.

ISO: A *International Organization for Standardization* é o organismo internacional responsável pela elaboração de normas técnicas em diversas áreas, como qualidade, segurança, gestão, tecnologia e processos industriais. Suas normas servem como referência global para padronizar produtos, serviços e sistemas.

1.2.2 Etapas de elaboração do projeto

O desenvolvimento de um projeto elétrico industrial segue uma sequência lógica de etapas interdependentes, frequentemente com iterações que variam conforme o contexto, nas quais cada fase fornece subsídios para a etapa subsequente (Chapman, 2012). De modo geral, esse processo pode ser organizado nas seguintes etapas:

1. **Definição de requisitos:** Consiste na identificação da finalidade da instalação, no levantamento preliminar das cargas, na classificação dos equipamentos, na verificação da alimentação elétrica disponível e na definição dos critérios básicos de segurança. Como resultado, obtém-se uma lista preliminar de cargas, acompanhada dos requisitos de projeto e das principais premissas técnicas.
2. **Análise de viabilidade:** Envolve a verificação das normas aplicáveis, a análise das condições de instalação e a avaliação de restrições físicas, ambientais e operacionais. Essa etapa permite estabelecer os critérios normativos, as limitações técnicas e as condições de contorno que orientarão o desenvolvimento do projeto.
3. **Concepção inicial:** Corresponde à definição da arquitetura geral de distribuição elétrica, à localização preliminar dos quadros, à setorização da instalação e à escolha inicial dos trajetos dos circuitos. O produto esperado dessa etapa inclui esquemas preliminares, proposta de distribuição e organização espacial da instalação.
4. **Detalhamento técnico e cálculos elétricos:** Compreende o cálculo de demanda, o cálculo de correntes elétricas, a escolha e dimensionamento de condutores, a verificação da queda de potencial elétrico, a seleção dos dispositivos de proteção, os critérios de aterramento e a análise de seletividade. Como resultado, são produzidos o memorial de cálculo, o quadro de cargas e as especificações técnicas dos principais componentes.
5. **Revisão e validação:** Consiste na conferência da coerência entre cálculos, desenhos, normas, cargas levantadas e dispositivos selecionados. Nessa fase, inconsistências são identificadas e corrigidas, resultando em um projeto revisado, tecnicamente justificado e mais seguro para execução.
6. **Geração dos desenhos finais:** Envolve a elaboração das plantas, diagramas unifilares, detalhes executivos, identificação dos circuitos e lista de materiais. O produto técnico esperado é o conjunto de desenhos executivos e documentação final necessária para aprovação, execução ou manutenção da instalação.
7. **Compartilhamento e controle documental:** Corresponde à emissão, ao versionamento de arquivos, ao registro dos responsáveis técnicos e à distribuição da documentação para execução, aprovação ou arquivamento. Essa etapa garante que a documentação permaneça organizada, rastreável e coerente com a versão vigente. Note que a organização do projeto independe da tecnologia adotada para gerenciar as informações.

Embora as etapas estejam apresentadas em sequência, o processo real de projeto não é estritamente linear e depende das especificações particulares de cada caso. É comum que novas informações sejam incorporadas durante o desenvolvimento, exigindo o retorno a fases anteriores. Por exemplo, a identificação de uma carga adicional pode modificar um ou mais quadros de cargas, alterar o cálculo de demanda, exigir nova seção de condutor e levar à substituição do dispositivo de proteção previamente selecionado.

A Figura 1.1 representa esse comportamento iterativo. O fluxograma mostra que o projeto elétrico funciona como um algoritmo técnico: inicia-se com a definição de requisitos, passa por análise normativa, concepção, cálculo e validação, mas pode retornar a etapas anteriores quando forem identificadas inconsistências ou novas necessidades.

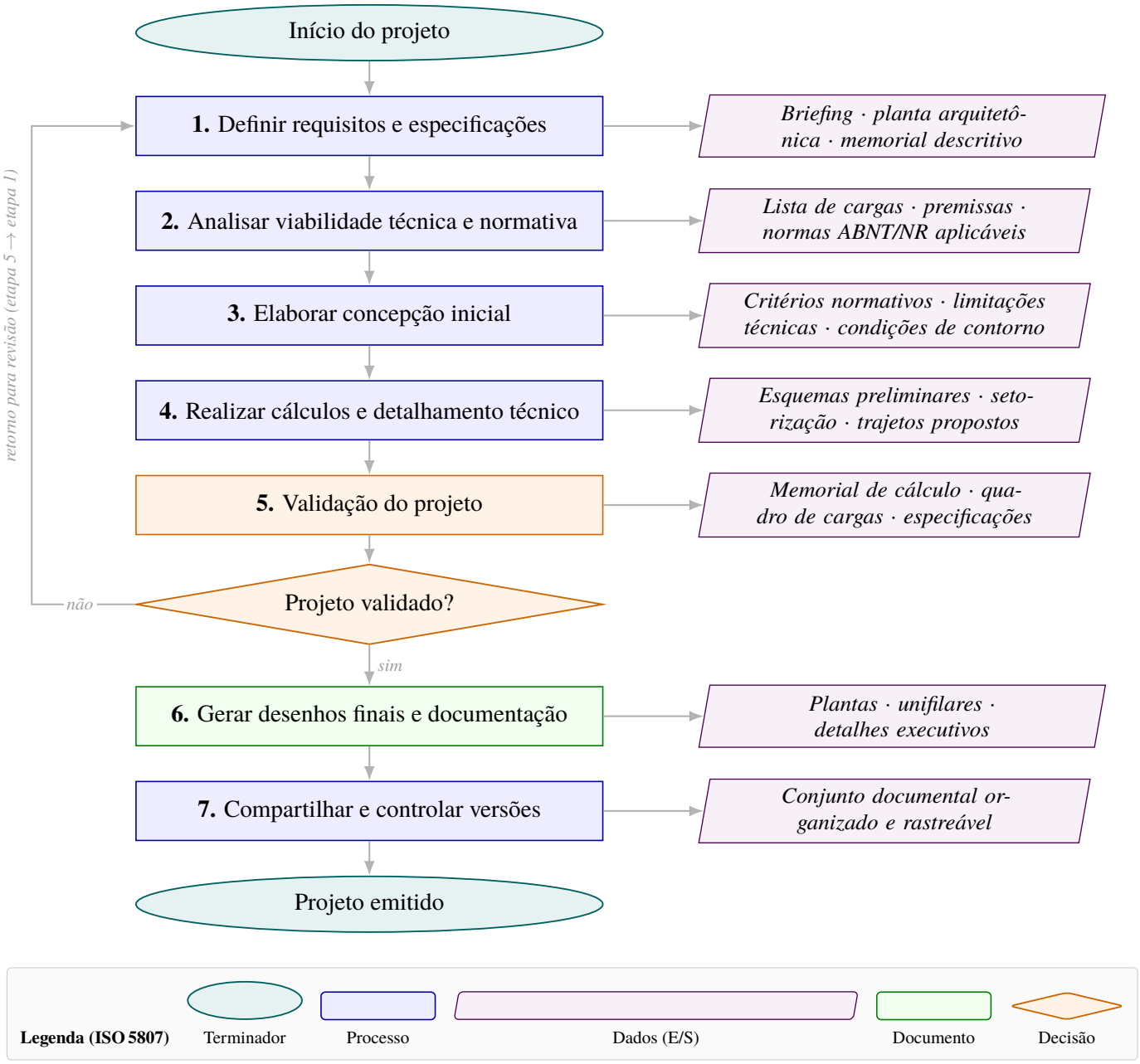

Figura 1.1: Fluxograma iterativo das etapas de elaboração de um projeto elétrico industrial.

Cada uma dessas etapas deve ser executada de forma iterativa, sendo comum a revisão de decisões anteriores à medida que novas informações são incorporadas ao projeto. Essa característica reforça a necessidade de manter registros organizados, versões atualizadas e rastreabilidade entre cálculos, desenhos e especificações.

1.2.3 Classificação das cargas industriais

A classificação das cargas industriais está diretamente associada à primeira etapa indicada na seção anterior e na Figura 1.1: a definição de requisitos e o levantamento de cargas. Nessa fase, são identificados os equipamentos que compõem a instalação, suas potências, formas de alimentação, regime de operação e natureza físico-elétrica.

O conhecimento detalhado do tipo de carga é indispensável, pois a natureza físico-elétrica de cada equipamento influencia o dimensionamento dos condutores, a escolha dos dispositivos de proteção, a análise do fator de potência, a previsão de correntes de partida e a configuração geral do sistema elétrico. Assim, duas cargas com a mesma potência ativa podem exigir soluções de projeto diferentes se apresentarem comportamentos elétricos distintos.

Para o correto dimensionamento elétrico, as cargas devem ser classificadas conforme sua natureza físico-elétrica.

Definição

Natureza físico-elétrica: Refere-se ao comportamento da carga frente às grandezas elétricas, especialmente à relação entre diferença de potencial elétrico, corrente e potência. Essa classificação permite identificar se a carga consome potência predominantemente ativa, demanda potência reativa, apresenta comportamento capacitivo, produz distorções harmônicas ou exige considerações específicas de partida, regime de operação e proteção.

Do ponto de vista do projeto elétrico, uma carga não deve ser analisada apenas por seu valor numérico de potência. Deve-se observar se o dado informado representa potência ativa [W], potência aparente [VA], potência reativa [VAr], potência mecânica [cv] ou [HP], potência térmica [W], [kW] ou [Btu/h], ou ainda capacidade de refrigeração. Essa distinção evita comparações inadequadas entre grandezas de naturezas diferentes e será retomada nos capítulos seguintes, especialmente no estudo de potência elétrica, fator de potência, motores e cálculo de demanda.

Em instalações industriais, observa-se a predominância de cargas indutivas, associadas principalmente a motores elétricos, as quais demandam potência reativa e influenciam diretamente o fator de potência do sistema (Chapman, 2012). Esses conceitos serão aprofundados nos capítulos seguintes, especialmente no estudo de grandezas elétricas, potência, sistemas trifásicos, motores e cálculo de corrente. Neste momento, é suficiente reconhecer que diferentes tipos de carga produzem efeitos distintos sobre a instalação.

A Tabela 1.1 apresenta, de forma genérica e não exaustiva, categorias típicas de cargas elétricas, eletrotérmicas e eletromecânicas encontradas em instalações industriais, juntamente com suas principais características elétricas.

Tabela 1.1: Classificação de cargas em instalações industriais

Categoria	Exemplo	Característica elétrica
Resistiva	Fornos, estufas e aquecedores.	Consumo predominantemente ativo, com $\cos\phi \approx 1$.
Indutiva	Motores e transformadores.	Consumo de potência reativa indutiva, com $\cos\phi < 1$.
Capacitiva	Bancos de capacitores e filtros.	Armazenamento de energia, compensação reativa.
Não linear	Inversores e fontes chaveadas.	Presença de harmônicas e distorção da corrente elétrica.
Iluminação	Luminárias LED e fluorescentes.	Baixa potência individual e fator de potência variável.

Cargas resistivas são associadas principalmente à dissipação térmica, enquanto cargas indutivas armazenam energia em campos magnéticos, impactando diretamente o fator de potência. Cargas capacitivas, por sua vez, armazenam energia em campos elétricos e podem fornecer potência reativa capacitiva, sendo frequentemente associadas à compensação de potência reativa em instalações com predominância de cargas indutivas. Já as cargas não lineares introduzem distorções na forma de onda da corrente, exigindo cuidados adicionais no projeto, especialmente em instalações com equipamentos eletrônicos de potência. Existem ainda outras categorias de comportamento elétrico, como dispositivos baseados em memristores, porém estes não fazem parte do escopo usual das aplicações em instalações elétricas prediais e industriais abordadas neste material.

1.2.4 Estrutura de uma instalação elétrica industrial

Uma instalação elétrica predial apresenta, em geral, uma arquitetura mais simples que uma instalação industrial, pois costuma envolver menor diversidade de cargas, menores níveis de potência, menor complexidade operacional e menos níveis de distribuição. Por esse motivo, nesta seção será analisada a arquitetura de um sistema elétrico industrial, entendendo-se que a instalação predial pode ser tratada como um caso particular mais simples desse mesmo princípio organizacional.

Em uma instalação industrial, o sistema elétrico é estruturado de forma hierárquica, iniciando-se no ponto de entrega da concessionária, podendo haver mais de um ponto de entrega em instalações de maior porte, e seguindo pelos níveis de transformação, medição, proteção, distribuição e alimentação das cargas. Essa organização é fundamental porque favorece a seletividade da proteção, a divisão por setores, a manutenção preventiva e corretiva, além de facilitar a expansão futura da instalação e a integração de novos equipamentos ou linhas de produção.

A Figura 1.2 apresenta uma estrutura típica de distribuição, com a energia sendo conduzida da rede da concessionária até os centros de controle de motores e cargas finais.

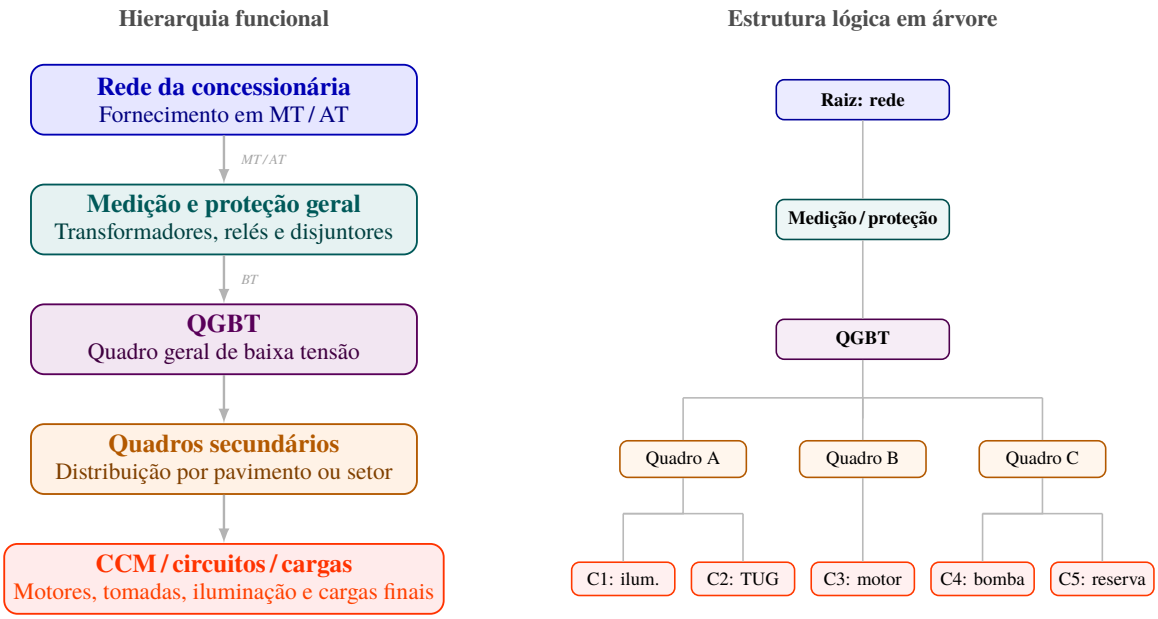

Figura 1.2: Hierarquia básica de distribuição em um sistema elétrico.

Nota

CCM e carga final: Um Centro de Controle de Motores (CCM) não deve ser interpretado como uma carga elétrica final, mas como um conjunto de manobra, proteção, comando e controle destinado à alimentação de motores e equipamentos auxiliares. A carga final é o equipamento que efetivamente consome energia para realizar uma função produtiva, como um motor, bomba, ventilador, compressor ou esteira transportadora. Assim, enquanto a carga representa o elemento consumidor de energia, o CCM representa o ponto organizado de distribuição e controle dessas cargas, reunindo dispositivos como disjuntores, contatores, relés de proteção, inversores de frequência e sistemas de comando.

Essa estrutura permite a segmentação da instalação em níveis, facilitando proteção, operação e manutenção. Em instalações industriais de maior porte, cada nível pode possuir dispositivos próprios de proteção, medição e manobra, permitindo que falhas sejam isoladas com menor impacto sobre os demais setores.

Saiba Mais

Topologia em árvore e aninhamento de cargas: A representação em árvore é frequentemente adequada aos problemas de fornecimento de energia elétrica, especialmente em sistemas de distribuição radial. Nesse tipo de organização, a energia parte de um ponto de origem, como a rede da concessionária ou a entrada geral da instalação, passa por níveis intermediários de distribuição e chega, ao final, aos circuitos terminais e às cargas.
Essa estrutura pode ser entendida como uma relação entre elementos **alimentadores** e elementos **alimentados**. Um quadro geral alimenta quadros secundários; cada quadro secundário alimenta circuitos; cada circuito, por sua vez, alimenta uma ou mais cargas finais. Assim, cada nível depende eletricamente do nível anterior, formando uma hierarquia semelhante à de uma árvore: há uma raiz, ramos intermediários e folhas.
O conceito de **aninhamento** significa que um conjunto de elementos está contido dentro de outro conjunto maior. Em uma instalação elétrica, por exemplo, uma carga final está aninhada em um circuito terminal; esse circuito está aninhado em um quadro secundário; o quadro secundário está aninhado no QGBT; e o QGBT está aninhado na estrutura geral de fornecimento da instalação. Portanto, ao analisar um quadro alimentador, deve-se considerar não apenas o próprio quadro, mas também todos os circuitos e cargas que dependem dele.
Essa ideia é importante porque grandezas como corrente elétrica, potência instalada, demanda e queda de diferença de potencial elétrico não são analisadas de forma isolada. As cargas localizadas nos níveis inferiores influenciam o dimensionamento dos níveis superiores. Por isso, em projetos elétricos, é comum que a análise seja feita em dois sentidos complementares: da fonte para as cargas, para compreender o caminho de alimentação, e das cargas para a fonte, para somar demandas, verificar correntes e dimensionar condutores e dispositivos de proteção.

Importante

Conformidade legal: A execução de uma instalação elétrica deve ser precedida de documentação técnica adequada e, quando aplicável, de projeto formal elaborado por profissional habilitado, respeitando-se os limites de suas atribuições profissionais. No caso de engenheiros e, quando aplicável, tecnólogos vinculados ao Sistema Confea/Crea, a responsabilidade técnica é formalizada por meio da **Anotação de Responsabilidade Técnica (ART)**, registrada junto ao respectivo CREA. Para técnicos industriais, como os técnicos em eletrotécnica, a atuação profissional é vinculada ao Sistema **CFT/CRTs**, sendo a responsabilidade formalizada pelo **Termo de Responsabilidade Técnica (TRT)**, observadas as atribuições e limitações estabelecidas para cada modalidade profissional.
Em empreendimentos que envolvam atividades de Arquitetura e Urbanismo, também pode haver responsabilidade técnica registrada perante o **CAU**, por meio do **Registro de Responsabilidade Técnica (RRT)**, restrito às atividades próprias desse conselho profissional. Assim, mais importante do que o título isolado do profissional é verificar se ele possui registro ativo no conselho competente, atribuição legal para a atividade contratada e o respectivo documento de responsabilidade técnica emitido. A ausência de projeto, ART, TRT ou RRT, quando exigível, compromete a rastreabilidade técnica, a segurança da instalação e a responsabilização formal pelos serviços executados.

Aviso

Responsabilidade técnica: A elaboração, a execução, a fiscalização e a responsabilidade técnica por projetos de instalações elétricas prediais e industriais não dependem apenas do cargo ocupado pelo profissional ou do nome comercial de sua formação. No Brasil, essas atividades devem estar compatíveis com as atribuições registradas no conselho profissional competente, com a formação curricular do profissional, com o campo de atuação autorizado e com o documento de responsabilidade técnica correspondente.
No caso dos profissionais vinculados ao Sistema Confea/Crea, como engenheiros e tecnólogos registrados no Crea, a responsabilidade técnica é formalizada por meio da **ART** (*Anotação de Responsabilidade Técnica*). No caso dos técnicos industriais vinculados ao Sistema CFT/CRT, a responsabilidade técnica é formalizada por meio do **TRT** (*Termo de Responsabilidade Técnica*). Assim, antes de se assumir ou contratar um projeto elétrico, deve-se verificar se o profissional possui registro ativo, atribuição compatível e documento de responsabilidade técnica emitido para aquela atividade específica.

Nota

Escopo de atuação profissional: De forma geral, o **engenheiro eletricista**, especialmente com formação ou ênfase em eletrotécnica, é o profissional de referência para projetos de geração, transmissão, distribuição e utilização da energia elétrica, bem como para o dimensionamento de condutores, dispositivos de proteção, quadros elétricos, sistemas de medição, comandos, aterramento, demanda, queda de diferença de potencial elétrico e demais elementos típicos de instalações elétricas prediais e industriais. O mesmo raciocínio se aplica ao **engenheiro industrial eletricista** ou ao **engenheiro industrial eletrotécnico**, quando suas atribuições registradas abrangerem geração, transmissão, distribuição e utilização da energia elétrica.

O **técnico industrial em eletrotécnica**, registrado no CRT, pode atuar em instalações elétricas dentro dos limites legais e normativos de sua habilitação. Em termos práticos, e sem substituir os critérios técnicos aplicáveis ao projeto, a referência usual para essa atuação é a demanda de até $800[\mathrm{kVA}]$, desde que a atividade seja compatível com sua formação e esteja devidamente registrada por TRT. Acima desses limites, ou quando houver complexidade incompatível com a habilitação técnica, a responsabilidade deve ser assumida por profissional de nível superior com atribuição específica, normalmente engenheiro eletricista ou profissional equivalente com atribuição formalmente reconhecida.

O **engenheiro eletrônico**, o **engenheiro de telecomunicações**, o **engenheiro de comunicação** e formações equivalentes possuem atuação típica em equipamentos eletrônicos, sistemas de comunicação, telecomunicações, instrumentação, medição, controle, sinais, automação e sistemas eletrônicos. Esses profissionais podem ser essenciais em instalações industriais modernas, especialmente em redes de comunicação, sensores, supervisórios, sistemas de controle, CFTV, automação e integração de equipamentos. Entretanto, isso não significa, por si só, autorização ampla para assumir o projeto completo de potência de uma instalação predial ou industrial, como entrada de energia, alimentadores, QGBT, seletividade, curto-circuito, queda de diferença de potencial elétrico e coordenação de proteção, salvo quando suas atribuições registradas também contemplarem esse campo.

O **engenheiro de controle e automação**, o **engenheiro de automação industrial**, o **engenheiro de instrumentação** e formações correlatas atuam principalmente no controle de processos, integração de máquinas, sensores, atuadores, CLPs, sistemas supervisórios, redes industriais, instrumentação e automação de unidades produtivas. Em instalações industriais, esse profissional pode projetar e especificar partes fundamentais do sistema de comando e controle. Contudo, o projeto elétrico de potência da instalação, incluindo alimentadores principais, quadros de distribuição, proteção geral, demanda e infraestrutura elétrica de força, deve respeitar as atribuições efetivamente registradas no Crea.

O **engenheiro de energia**, o **engenheiro de energias renováveis** e formações semelhantes têm atuação voltada a geração, conversão, conservação, armazenamento, eficiência energética e gestão de recursos energéticos. Dependendo do projeto pedagógico do curso e da análise da câmara especializada do Crea, pode haver atribuições relacionadas à transmissão, distribuição e utilização da energia elétrica. Por isso, a atuação desse profissional em projetos elétricos prediais e industriais deve ser avaliada caso a caso, principalmente quando envolver instalações consumidoras, subestações, entrada de energia, proteção e distribuição interna.

O **engenheiro mecânico**, o **engenheiro eletromecânico** e profissionais de áreas mecânicas ou de manutenção podem atuar em máquinas, equipamentos, sistemas mecânicos, utilidades industriais, manutenção e integração eletromecânica, conforme suas atribuições. Em ambientes industriais, sua participação é frequentemente necessária na especificação de motores, acionamentos, cargas mecânicas, sistemas de bombeamento, ventilação, refrigeração e máquinas de processo. Entretanto, a responsabilidade pelo projeto elétrico de alimentação, proteção, distribuição e comando dessas cargas deve ser assumida apenas quando o profissional possuir atribuição elétrica compatível. Caso contrário, a interface deve ser feita em conjunto com profissional habilitado na modalidade elétrica.

O **engenheiro de produção eletricista** ou profissional de produção com ênfase elétrica pode possuir atribuições relacionadas a processos de fabricação elétrica, métodos de produção, produto industrializado e organização de sistemas produtivos. Essa atuação não deve ser confundida automaticamente com a responsabilidade por projetos de instalações elétricas prediais ou industriais. A possibilidade de assinar projetos elétricos deve ser verificada pela certidão de atribuições do profissional.

O **engenheiro de computação**, o **engenheiro de software** e profissionais afins podem atuar em sistemas computacionais, integração de software, automação informacional, supervisão, aquisição de dados, redes, sistemas embarcados e soluções digitais. Esses campos podem dialogar com instalações elétricas modernas, especialmente em monitoramento, eficiência energética, automação predial e industrial. Porém, a responsabilidade pelo dimensionamento elétrico de potência, proteção, quadros, alimentadores e entrada de energia não decorre automaticamente dessas formações.

1.3 Resumo do capítulo

Neste capítulo, apresentou-se o projeto elétrico como instrumento técnico para a concepção, execução, operação, manutenção e documentação de instalações elétricas prediais e industriais. Destacou-se que o projeto deve ser compreendido como um processo estruturado, composto por cálculos, especificações, critérios de seleção de equipamentos, análise normativa, decisões técnicas e controle documental.

Foram definidos os conceitos de **projeto elétrico predial** e **projeto elétrico industrial**. O projeto predial foi associado a instalações de menor complexidade, voltadas a edificações residenciais, comerciais e sistemas auxiliares de baixa tensão. O projeto industrial foi caracterizado pela maior diversidade de cargas, presença de motores, quadros de distribuição, centros de controle de motores, sistemas de proteção, aterramento, subestações, correção de fator de potência e maior exigência de continuidade operacional.

Também foram discutidos os critérios funcionais de um projeto elétrico: **segurança**, **confiabilidade**, **eficiência** e **manutenibilidade**. Esses critérios orientam a prevenção de falhas, a continuidade do fornecimento, a redução de perdas, o uso adequado da energia e a facilidade de inspeções, intervenções e ampliações futuras.

O capítulo ressaltou a importância da conformidade normativa, com destaque para a **ABNT NBR 5410**, a **ABNT NBR 14039** e a **NR-10**, além de normas complementares relacionadas à proteção contra descargas atmosféricas, iluminação, locais especiais, conjuntos de manobra e comando, dispositivos de proteção, aterramento, atmosferas explosivas, sistemas fotovoltaicos e infraestrutura de recarga de veículos elétricos. Também foram apresentadas referências institucionais como **ABNT**, **NBR**, **IEC** e **ISO**.

Em seguida, foram descritas as principais etapas de elaboração de um projeto elétrico: definição de requisitos, análise de viabilidade, concepção inicial, detalhamento técnico e cálculos elétricos, revisão e validação, geração dos desenhos finais e compartilhamento com controle documental. Destacou-se que esse processo é iterativo, pois novas informações, alterações de carga, mudanças de layout ou inconsistências exigem retorno a etapas anteriores.

Na classificação preliminar das cargas industriais, foi enfatizada a natureza físico-elétrica dos equipamentos, distinguindo cargas resistivas, indutivas, capacitivas e não lineares. O capítulo também apresentou a estrutura hierárquica típica de uma instalação elétrica industrial e a topologia em árvore, na qual cargas, circuitos, quadros e sistemas superiores se organizam de forma aninhada. Essa noção é importante porque as cargas dos níveis inferiores influenciam o dimensionamento dos níveis superiores, especialmente em cálculos de corrente, potência instalada, demanda, queda de diferença de potencial elétrico, condutores e dispositivos de proteção.

Por fim, discutiu-se a responsabilidade técnica associada ao projeto e à execução de instalações elétricas. Foram apresentados documentos como a **ART**, o **TRT** e o **RRT**, conforme o conselho profissional competente. Destacou-se que a responsabilidade técnica depende das atribuições formalmente registradas, da modalidade de formação e da compatibilidade entre a atividade contratada e o escopo legal de atuação.

Aviso

Reprodução de normas técnicas: As normas técnicas da **ABNT** devem ser utilizadas como referência normativa, mas não devem ser reproduzidas integralmente, copiadas em trechos extensos ou distribuídas sem autorização do titular dos direitos. Em obras didáticas, memoriais de cálculo e projetos, recomenda-se citar a norma aplicável, indicar seu número e escopo geral, e explicar tecnicamente seus critérios com redação própria.
A reprodução indevida de conteúdo normativo pode gerar consequências editoriais, civis e legais, como necessidade de retirada ou revisão da obra, indenização, apreensão de exemplares ou suspensão de divulgação, conforme a legislação de direitos autorais aplicável. Por esse motivo, o projetista, autor ou editor deve consultar sempre as normas por meios oficiais e evitar transcrever textos normativos além do estritamente permitido por citação técnica justificada.

Capítulo 2

Grandezas elétricas e potência

2.1 Introdução

O dimensionamento adequado de sistemas elétricos depende da compreensão rigorosa e precisa das grandezas elétricas fundamentais e de suas inter-relações (Chapman, 2012; Alexander e Sadiku, 2017). Nesse contexto, a análise do tipo de sinal envolvido no circuito (continuo ou alternado), da diferença de potencial elétrico, da corrente elétrica e da potência constitui a base para o desenvolvimento de cálculos técnicos.

O objetivo deste capítulo consiste em apresentar as principais grandezas elétricas, bem como estabelecer as relações matemáticas que permitem a determinação da potência em sistemas mono e polifásicos. Busca-se fornecer ao discente uma base sólida para a análise de cargas elétricas e para o dimensionamento de condutores e dispositivos de proteção, em consonância com práticas consolidadas na tecnologia elétrica (Nilsson e Riedel, 2020).

2.2 Grandezas elétricas fundamentais

As grandezas elétricas fundamentais são utilizadas para descrever o comportamento dos circuitos e o fluxo de energia elétrica. Essas grandezas estabelecem a base conceitual para a análise de sistemas elétricos em regime permanente e para a interpretação dos fenômenos associados à transferência de energia.

Ao longo deste livro, todas as grandezas físicas e elétricas serão apresentadas preferencialmente segundo o Sistema Internacional de Unidades (SI), também conhecido como sistema internacional de pesos e medidas. Essa padronização facilita a interpretação dos cálculos, evita ambiguidades entre diferentes sistemas de unidades e permite a comunicação técnica de forma consistente em projetos, normas, memoriais de cálculo e especificações.

! Importante

Sistema internacional de unidades (SI): É o sistema metrológico adotado internacionalmente para expressar grandezas físicas de forma padronizada, coerente e reprodutível. Sua utilização permite que cálculos, medições, desenhos técnicos, especificações de equipamentos e documentos normativos sejam interpretados de maneira uniforme, reduzindo ambiguidades decorrentes do uso de sistemas de unidades distintos.
O SI é estruturado a partir de unidades de base (conhecidas como as *sete unidades fundamentais*), como o metro [m], o quilograma [kg], o segundo [s], o ampere [A], o kelvin [K], o mol [mol] e a candela [cd]. A partir dessas unidades, são definidas unidades derivadas de grande importância para a engenharia elétrica, como o volt [V], o watt [W], o joule [J], o ohm [Ω], o hertz [Hz], o farad [F], o henry [H], o weber [Wb] e o tesla [T].

Nota

Sistema padrão implícito: Em projetos elétricos, o emprego do SI é essencial para manter coerência entre memoriais de cálculo, diagramas, especificações, tabelas técnicas e normas aplicáveis. Assim, salvo indicação explícita em contrário, as grandezas e unidades apresentadas neste livro seguem o Sistema Internacional de Unidades. Quando forem mencionadas unidades usuais em catálogos, placas de identificação ou práticas comerciais, sua interpretação deverá ser compatibilizada com as unidades do SI utilizadas nos cálculos técnicos.

2.2.1 Diferença de potencial elétrico

A diferença de potencial elétrico, representada por $v(t)$ quando variável no tempo, corresponde à diferença de energia potencial elétrica por unidade de carga entre dois pontos de um circuito. Sua unidade no SI é o volt [V].

A energia potencial elétrica, representada por $e(t)$, está associada à posição de uma carga em um campo elétrico. Quando uma carga elétrica se desloca entre dois pontos com potenciais diferentes, pode haver conversão de energia potencial elétrica em trabalho elétrico, ou o processo inverso, dependendo do sentido do deslocamento e da ação do campo. Essa transferência de energia é representada por $w(t)$ e expressa a capacidade do campo elétrico de realizar trabalho sobre a carga. Assim, em termos físicos, a diferença de potencial elétrico indica quanta energia por unidade de carga está disponível para produzir deslocamento de cargas ou realizar trabalho elétrico.

De forma simplificada, pode-se escrever:

$$v(t) = \frac{\Delta e(t)}{q(t)}, \tag{2.1}$$

onde:

- $v(t)$ é a diferença de potencial elétrico, em volt [V];
- $e(t)$ é a variação de energia potencial elétrica entre dois pontos, em joule [J];
- $q(t)$ é a carga elétrica, ou quantidade de carga, em coulomb [C].

Quando se analisa um deslocamento entre dois pontos, a variação da energia potencial elétrica está associada ao trabalho realizado pelo campo elétrico. Em módulo, pode-se interpretar essa relação como:

$$|w(t)| = q(t) \cdot |v(t)|, \quad \text{note que:} \quad w(t) = \Delta e(t), \tag{2.2}$$

onde $w(t)$ representa o trabalho elétrico associado ao deslocamento da carga $q(t)$ sob uma diferença de potencial elétrico. Desse modo, uma "tensão elétrica" de 1 [V] significa que há 1 [J] de energia por 1 [C] de carga.

Nota

Diferença de potencial elétrico: O termo técnico mais adequado é *diferença de potencial elétrico*, pois essa grandeza sempre envolve a comparação entre dois pontos. Um único ponto possui potencial elétrico em relação a uma referência pré-estabelecida ou conhecida. Assim, a grandeza efetivamente aplicada a um dispositivo, equipamento, circuito ou componente é a diferença entre os potenciais de dois de seus terminais.
Na prática da engenharia, utiliza-se amplamente o termo *tensão elétrica* como sinônimo de diferença de potencial elétrico, especialmente em normas, catálogos técnicos e esquemas de instalação. Recomenda-se, entretanto, usar a expressão completa quando houver risco de ambiguidade, pois o termo *tensão* também pode aparecer em outros contextos físicos, como tensão mecânica ou tensão superficial.

Saiba Mais

Terminologia associada: O anglicismo *voltagem* não é tecnicamente recomendado em português. Embora alguns anglicismos sejam incorporados ao vocabulário técnico, neste caso recomenda-se evitar seu uso, pois as expressões *diferença de potencial elétrico* e *tensão elétrica* já são consolidadas na literatura técnica em português.
Outros termos encontrados em diferentes contextos são *potencial elétrico*, *queda de potencial* e *força eletromotriz*. Esses termos não são sempre equivalentes entre si, mas estão relacionados à ideia de energia elétrica por unidade de carga e devem ser interpretados conforme o contexto físico ou normativo em que aparecem.

Essa grandeza está associada à capacidade de realizar trabalho elétrico, sendo responsável por estabelecer as condições necessárias para o deslocamento de cargas em um circuito (Alexander e Sadiku, 2017). Em termos práticos, quanto maior a diferença de potencial elétrico aplicada a uma carga, maior tende a ser a corrente resultante, desde que a impedância do circuito permaneça constante.

2.2.2 Corrente elétrica

A corrente elétrica, $i(t)$, é o fluxo de cargas elétricas, por uma seção de referência, ao longo do tempo. Sua unidade é o ampere $[\mathrm{A}]$. Para uma primeira interpretação, pode-se utilizar a forma discreta da definição:

$$i(t) = \frac{\Delta q}{\Delta t}, \tag{2.3}$$

onde Δq representa a quantidade de carga elétrica, medida em coulombs $[\mathrm{C}]$, que atravessa uma seção do condutor durante um intervalo de tempo Δt, em segundos $[\mathrm{s}]$. Assim, se uma quantidade maior de carga passa pelo condutor no mesmo intervalo de tempo, a corrente elétrica é maior. Essa forma é mais intuitiva para uma primeira leitura, pois relaciona "quantidade de carga" (medida de quanto "material elétrico") com "tempo de passagem".

Em uma análise mais precisa, quando a carga varia continuamente no tempo, utiliza-se a derivada temporal:

$$i(t) = \frac{d}{dt}\big(q(t)\big), \tag{2.4}$$

onde o operator "$\frac{d}{dt}(\bullet)$" indica taxa de variação do seu argumento em relação ao tempo. Portanto, essa expressão afirma que a corrente elétrica instantânea corresponde à rapidez com que a carga elétrica varia ou atravessa uma seção do circuito em cada instante. Utilizando as Equações 2.3 e 2.4 é possível verificar que $[\mathrm{A}] = [\mathrm{C/s}]$.

Saiba Mais

Modelo físico da corrente elétrica: Ao afirmar que "a carga se move" ou que "os elétrons viajam pelos cabos", adota-se uma interpretação simplificada associada ao **modelo clássico de Drude da condução elétrica**, proposto pelo físico alemão **Paul Karl Ludwig Drude**. Nesse modelo, os elétrons livres são tratados como partículas que se deslocam pelo condutor sob ação do campo elétrico, sofrendo colisões com a estrutura do material.
Essa representação é muito útil para cálculos iniciais e para a compreensão prática da corrente elétrica. Entretanto, em uma análise física mais detalhada, a condução pode ser descrita por modelos mais refinados, como o **modelo de Drude-Lorentz**, o **modelo de elétrons livres de Sommerfeld**, a **teoria de bandas dos sólidos**, a **equação de transporte de Boltzmann** e, em abordagens mais avançadas, o **formalismo de Kubo** para transporte elétrico. Esses modelos permitem considerar efeitos quânticos, distribuição estatística dos elétrons, estrutura eletrônica dos materiais e mecanismos microscópicos de espalhamento. Independente do modelo, um coulomb $[\mathrm{C}]$ é aproximadamente $6{,}242 \times 10^{18}$ elétrons. Em materiais condutores reais, a condução envolve a interação dos elétrons com a rede cristalina, incluindo fônons, isto é, vibrações quantizadas da estrutura atômica. Além disso, a transferência de energia está relacionada à propagação eletromagnética ao redor dos condutores, não apenas ao deslocamento dos elétrons. Embora seja didático imaginar cargas atravessando o condutor, os elétrons individuais possuem velocidade média de deriva muito pequena. O efeito elétrico percebido resulta principalmente da reorganização coletiva das cargas e da propagação eletromagnética.

Assim, a corrente elétrica pode ser interpretada como a taxa de variação da carga elétrica ao longo do tempo, constituindo uma grandeza essencial para o dimensionamento de condutores e dispositivos de proteção (Nilsson e Riedel, 2020). Em projetos elétricos, a corrente é uma das grandezas mais importantes, pois está diretamente relacionada ao aquecimento dos condutores, à escolha dos dispositivos de proteção e às perdas elétricas.

2.2.3 Potência elétrica

A potência elétrica, representada por $p(t)$ quando variável no tempo, corresponde à taxa de transferência de energia elétrica em um sistema. Sua unidade é o watt [W]. De forma geral:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}\big(w(t)\big). \tag{2.5}$$

Essa expressão indica a potência instantânea, isto é, o valor da potência em cada instante de tempo. A notação "$\bullet(t)$" é especialmente útil quando são analisados sinais variáveis, formas de onda, funções genéricas, regimes transitórios ou circuitos em corrente alternada nos quais a potência pode variar ao longo do ciclo.

Definição

Potência elétrica: Define-se potência elétrica como a quantidade de energia transferida por unidade de tempo em um circuito elétrico. Essa transferência pode contemplar fornecimento, consumo, transporte, conversão ou armazenamento de energia. Em outras palavras, a potência indica a rapidez com que a energia elétrica é utilizada.

Quando as grandezas elétricas podem ser tratadas como constantes, médias (usando alguma ferramenta de normalização, e.g.: norma Euclidiana quando $p = 2$, na *norma-p*) ou especificadas em regime permanente, utiliza-se comumente a letra maiúscula P. Em regime contínuo, por exemplo, quando a diferença de potencial elétrico e a corrente são constantes, tem-se:

$$P = V \cdot I. \tag{2.6}$$

Em corrente alternada, entretanto, a potência deve ser analisada considerando valores eficazes, defasagem angular e, em sistemas polifásicos, a quantidade de fases e a forma de ligação.

2.3 Potência em corrente alternada

Embora existam diversas formas de onda, a forma senoidal predomina nos sistemas elétricos devido à sua relação direta com geradores eletromecânicos rotativos. A rotação uniforme de máquinas síncronas produz diferenças de potencial elétrico senoidais, o que levou à padronização desse tipo de sinal em sistemas de potência.

Em circuitos de corrente alternada, a potência pode ser analisada por meio de três grandezas distintas, relacionadas ao ângulo de defasagem ϕ entre a diferença de potencial elétrico e a corrente. Essa classificação não depende da quantidade de fases do sistema: ela é válida tanto para circuitos monofásicos quanto para sistemas bifásicos, trifásicos ou polifásicos. O que muda, conforme o número de fases e a forma de ligação, é a expressão utilizada para calcular os valores totais do sistema.

A **potência ativa** P representa a parcela da potência efetivamente convertida em trabalho útil (e.g.: calor, movimento, iluminação); sua unidade usual é o watt [W]. A **potência reativa** Q está associada à energia alternadamente armazenada e devolvida por elementos como indutores e capacitores, sem conversão líquida em trabalho ao longo de um ciclo completo; sua unidade usual é o volt-ampere reativo [VAr]. Já a **potência aparente** S representa a combinação global dos efeitos ativo e reativo, sendo obtida, em sua forma mais básica, pelo produto dos valores eficazes da diferença de potencial elétrico e da corrente; sua unidade usual é o volt-ampere [VA]:

$$P = V \cdot I \cdot \cos\phi, \qquad Q = V \cdot I \cdot \sin\phi, \qquad S = V \cdot I. \tag{2.7}$$

Importante

Relação fundamental: A relação geométrica entre essas três grandezas é representada pelo *triângulo de potências*, mostrado na Figura 2.1. Nesse triângulo, P e Q formam os catetos de um triângulo retângulo cuja hipotenusa é S, o que conduz diretamente à relação fundamental (teorema de Pitágoras):

$$S^2 = P^2 + Q^2. \tag{2.8}$$

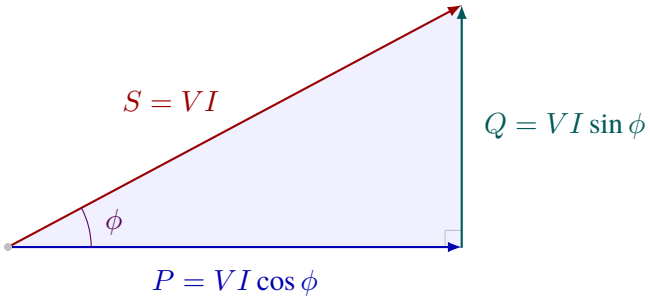

Figura 2.1: Relação geométrica entre potência aparente S, potência ativa P e potência reativa Q.

A Figura 2.1 também permite interpretar o fator de potência como uma relação geométrica. Quanto menor for o ângulo ϕ, maior será a parcela de potência aparente convertida em potência ativa.

Nota

Origem fasorial do triângulo de potências: O triângulo de potências não é apenas uma construção geométrica conveniente. Em uma análise mais profunda de circuitos em corrente alternada senoidal, ele resulta da representação fasorial das grandezas elétricas no plano dos números complexos.
Nesse contexto, a potência pode ser representada pela potência complexa:

$$S = P + jQ, \tag{2.9}$$

em que P corresponde à parte real, associada à potência ativa, e Q corresponde à parte imaginária, associada à potência reativa. O símbolo j representa a unidade imaginária, usualmente empregada em engenharia elétrica para evitar conflito com a corrente elétrica $i(t)$.
Assim, o triângulo de potências surge da decomposição da potência complexa no plano real-imaginário: o eixo real representa P, o eixo imaginário representa Q e o módulo do fasor S representa a potência aparente:

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2}. \tag{2.10}$$

Portanto, a relação $S^2 = P^2 + Q^2$ decorre diretamente da geometria dos números complexos aplicada à análise fasorial de sistemas em corrente alternada.

2.3.1 Fator de potência

O fator de potência é definido como a razão entre a potência ativa e a potência aparente:

$$\cos\phi = \frac{P}{S}. \tag{2.11}$$

Essa relação indica a fração da potência aparente que é efetivamente convertida em potência ativa. Quanto mais próximo de 1 for o fator de potência, maior será o aproveitamento da corrente elétrica para a realização de trabalho útil. Note que se $\phi \to 0$ então $\cos\phi \to 1$, ou seja, a componente reativa tende a ser nula.

Em instalções industriais e prediais a caraterística indutiva no fator de potência é predominante, isto é: ϕ é possitivo (sentido anti-horário) e cos ϕ está, de forma geral e aproximada, entre $0{,}60$ e $0{,}95$.

Aviso

Baixo fator de potência: Valores reduzidos de fator de potência resultam em aumento de corrente, maiores perdas nos condutores, aumento da queda de tensão e possível necessidade de sobredimensionamento de componentes. Em instalações atendidas por concessionárias, também podem ocorrer penalizações tarifárias quando os limites regulamentares não são atendidos.

2.3.2 Interpretação física do fator de potência

O fator de potência representa o grau de alinhamento entre $v(t)$ e $i(t)$. Em cargas predominantemente resistivas, $\cos\phi \approx 1$, pois a diferença de potencial elétrico e a corrente estão praticamente em fase. Em cargas indutivas, como motores e transformadores, ocorre defasagem significativa, pois parte da energia é temporariamente armazenada em campos magnéticos e devolvida à rede a cada ciclo.

Do ponto de vista do projeto elétrico, um baixo fator de potência implica maior corrente para a mesma potência ativa. Esse aumento de corrente eleva as perdas por efeito Joule, intensifica o aquecimento dos condutores e pode exigir condutores e dispositivos de proteção de maior capacidade.

Definição

Efeito Joule: É o fenômeno de conversão de energia elétrica em calor quando uma corrente atravessa um material com resistência elétrica. Em condutores, a potência dissipada pode ser estimada por: $P = R \cdot I^2$, onde P é a potência dissipada em forma de calor, R é a resistência elétrica do condutor e I é a corrente elétrica. Como a corrente aparece elevada ao quadrado, pequenos aumentos de corrente produzem aumentos significativos de aquecimento.

2.4 Potência em sistemas polifásicos e trifásicos

As expressões de potência ativa, reativa e aparente apresentadas anteriormente não dependem, em sua natureza física, da quantidade de fases do sistema. Elas descrevem a forma como a energia elétrica é convertida, armazenada e transportada em corrente alternada. O que se modifica em sistemas polifásicos é a maneira de somar as contribuições de cada fase e a relação entre grandezas de fase e grandezas de linha.

Em um sistema polifásico balanceado, todas as fases possuem mesma magnitude de diferença de potencial elétrico, mesma corrente e mesma defasagem angular ϕ entre diferença de potencial elétrico e corrente. Assim, a potência total pode ser obtida pela soma das potências de cada fase. Para um sistema balanceado com n fases, em termos de grandezas de fase, tem-se:

$$P = S \cdot \cos\phi, \qquad Q = S \cdot \sin\phi, \qquad S = n \cdot V_F \cdot I_F, \tag{2.12}$$

onde:

- n é o número de fases do sistema;
- V_F é a diferença de potencial elétrico de fase, em volt [V];
- I_F é a corrente de fase, em ampere [A];
- cos ϕ é o fator de potência da carga;
- P, Q e S são, respectivamente, as potências ativa, reativa e aparente totais do sistema.

Nota

Fase vs. linha: Em um sistema elétrico polifásico balanceado, uma **grandeza de fase** é aquela medida diretamente em uma fase individual da carga ou da fonte, como a diferença de potencial elétrico entre uma fase e o ponto neutro, ou a corrente que atravessa uma impedância de fase. Já uma **grandeza de linha** é aquela medida entre os condutores de alimentação do sistema, como a diferença de potencial elétrico entre duas fases, ou a corrente que circula em cada condutor de linha. Assim, a distinção fundamental está no ponto de referência da medição: grandezas de fase descrevem o comportamento interno de cada fase da carga ou fonte, enquanto grandezas de linha descrevem as grandezas disponíveis nos condutores externos que alimentam o sistema.

Para sistemas polifásicos balanceados com $n \geq 2$, quando se utilizam grandezas de linha, a potência aparente total pode ser expressa por:

$$P = S \cdot \cos\phi, \qquad Q = S \cdot \sin\phi, \qquad S = \frac{n}{2\sin\left(\frac{\pi}{n}\right)} \cdot V_L \cdot I_L, \tag{2.13}$$

onde:

- V_L é a diferença de potencial elétrico de linha, em volt [V];
- I_L é a corrente de linha, em ampere [A].

Essa expressão não deve ser aplicada quando $n = 1$, pois a diferença de potencial elétrico só faz sentido entre dois condutores. Como a tensão elétrica entre a mesma linha V_L é nula, torna-se necessário o uso do condutor neutro; consequentemente, em sistemas monofásicos, utiliza-se diretamente a expressão $S = V_F \cdot I_F$.

Importante

Sistemas trifásicos: Sistemas trifásicos são amplamente utilizados em ambientes industriais porque permitem transmissão de potência de forma mais uniforme e eficiente. Em um sistema trifásico equilibrado, as potências instantâneas das três fases se complementam, reduzindo pulsações globais de potência.
O melhor aproveitamento dos condutores ocorre porque, para uma mesma potência total transmitida, a corrente de linha pode ser menor do que em uma alimentação monofásica equivalente. Como as perdas nos condutores dependem de I^2, correntes menores resultam em menores perdas e menor aquecimento.
Além disso, motores trifásicos apresentam torque mais uniforme porque as três fases defasadas de $120°$ produzem um campo magnético girante mais regular. Esse campo girante favorece a partida, reduz pulsações mecânicas e melhora o desempenho de máquinas elétricas industriais.

Para o caso particular de sistemas trifásicos balanceados, tem-se $n = 3$. Portanto:

$$P = S \cdot \cos\phi, \quad Q = S \cdot \sin\phi, \quad S = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L. \tag{2.14}$$

A presença do fator $\sqrt{3}$ decorre da relação fasorial entre grandezas de fase e grandezas de linha em sistemas trifásicos equilibrados. Essa expressão é amplamente utilizada em projetos industriais, pois muitos motores, transformadores, quadros de distribuição e equipamentos de maior potência são alimentados por redes trifásicas.

Definição

Sistema trifásico balanceado: Um sistema trifásico é considerado balanceado quando as três fases possuem mesma magnitude de diferença de potencial elétrico e corrente, com defasagem angular de $120°$ elétricos entre si.

Exemplo

Cálculo de potência trifásica: Considere uma carga trifásica balanceada alimentada por uma rede de 220 [V], com corrente de linha igual a 15 [A] e fator de potência igual a 0,8. A potência ativa é dada por:

$$P = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 15 \cdot 0{,}8$$

$$P \approx 4570\,[\text{W}]$$

Assim, a carga absorve aproximadamente 4,57 [kW] de potência ativa.

2.4.1 Outras grandezas relevantes

Além das grandezas já apresentadas, algumas relações complementares são utilizadas com frequência na análise e no projeto de instalações elétricas. A frequência elétrica é definida como o inverso do período, isto é, $f = 1/T$, em que f representa a frequência, em hertz [Hz], e T representa o período do sinal, em segundo [s]; essa grandeza possui interpretação direta principalmente em sinais periódicos. A energia elétrica consumida por uma carga pode ser expressa por $E = P \cdot t$, em que E é a energia elétrica, P é a potência ativa e t é o intervalo de tempo de funcionamento. Já em sistemas de corrente alternada senoidal, os valores eficazes de diferença de potencial elétrico e corrente são dados, respectivamente, por $V_{\text{rms}} = V_{\text{max}}/\sqrt{2}$ e $I_{\text{rms}} = I_{\text{max}}/\sqrt{2}$.

Nota

Amplitude de sinais senoidais: V_{max} e I_{max} representam as amplitudes máximas das formas de onda senoidais ou cossenoidais da diferença de potencial elétrico e da corrente. Ou seja, correspondem aos valores de pico de $v(t)$ e $i(t)$ durante um ciclo. Para sinais senoidais puros, esses valores de pico são maiores que os eficazes, pois o valor RMS representa o equivalente em corrente contínua quanto ao efeito térmico produzido em uma carga resistiva.

Aplicação Prática

Valor eficaz: Quando se mede uma tomada de 127 [V] ou uma rede de 220 [V] com um multímetro em corrente alternada, o valor indicado pelo instrumento é, em geral, o valor eficaz, e não o valor máximo da senoide. Isso significa que uma rede de 220 [V] possui valor de pico maior que 220 [V], mas produz em uma carga resistiva o mesmo efeito térmico que uma fonte contínua de 220 [V].
Por esse motivo, os cálculos de corrente, potência, queda de tensão, aquecimento de condutores e seleção de dispositivos de proteção utilizam valores eficazes. Assim, quando um motor, disjuntor, cabo ou transformador é especificado para determinada diferença de potencial elétrico ou corrente em corrente alternada, entende-se que esses valores nominais são valores RMS (*Root Mean Square*), salvo indicação explícita em contrário.

Aviso

Cuidado com grandezas instantâneas, eficazes e nominais: Em cálculos de projeto elétrico, não se deve misturar valores instantâneos, valores máximos, valores eficazes e valores nominais sem verificar o significado físico de cada grandeza. Expressões como $v(t)$, $i(t)$ e $p(t)$ representam grandezas variáveis no tempo, enquanto V, I e P geralmente indicam valores eficazes, médios, nominais ou de regime permanente, conforme o contexto.
Em corrente alternada senoidal, os cálculos usuais de potência, corrente, queda de tensão e aquecimento são realizados com valores eficazes. Assim, uma rede indicada como 220 [V] normalmente não se refere ao valor máximo da senoide, mas ao valor RMS. Do mesmo modo, potência ativa P, potência reativa Q e potência aparente S não devem ser tratadas como grandezas equivalentes: cada uma descreve um aspecto distinto da transferência de energia no circuito.

2.5 Resumo do capítulo

Neste capítulo, foram apresentadas as principais grandezas elétricas utilizadas na análise de sistemas elétricos, com destaque para a diferença de potencial elétrico, a corrente elétrica e a potência. Também foi estabelecido que as unidades adotadas ao longo da obra seguem o Sistema Internacional de Unidades (SI), garantindo padronização entre cálculos, especificações, memoriais técnicos e documentação de projeto.

A diferença de potencial elétrico foi interpretada como energia por unidade de carga entre dois pontos de um circuito, enquanto a corrente elétrica foi definida como a taxa de variação da carga elétrica ao longo do tempo. Discutiu-se ainda que a interpretação usual de cargas ou elétrons "se movendo" nos condutores corresponde a um modelo simplificado, associado ao modelo clássico de Drude da condução elétrica, sendo que análises mais profundas envolvem interações com a rede cristalina, fônons e campos eletromagnéticos.

Em seguida, definiu-se a potência elétrica como taxa de transferência de energia, inicialmente em sua forma instantânea, $p(t) = v(t) \cdot i(t)$, e posteriormente em regime permanente. Foram apresentadas as relações entre potência ativa P, potência reativa Q e potência aparente S em corrente alternada, bem como o triângulo de potências e sua interpretação fasorial no plano complexo. Essa abordagem permitiu compreender a relação $S^2 = P^2 + Q^2$ e o significado físico do fator de potência.

O capítulo também discutiu o fator de potência como medida do aproveitamento da potência aparente na produção de potência ativa. Foram analisadas as consequências técnicas de baixos valores de fator de potência, como aumento da corrente, maiores perdas por efeito Joule, aquecimento dos condutores, queda de tensão e possível necessidade de sobredimensionamento de componentes.

Por fim, foram apresentadas as expressões de potência em sistemas polifásicos e trifásicos balanceados, distinguindo grandezas de fase e grandezas de linha. Para sistemas trifásicos, destacou-se a origem do fator $\sqrt{3}$ e sua aplicação prática no cálculo de potências ativa, reativa e aparente. Também foram introduzidas grandezas complementares, como frequência, energia elétrica e valores eficazes RMS, fundamentais para os capítulos seguintes, especialmente no estudo de cargas, dimensionamento de condutores, queda de tensão e seleção de dispositivos de proteção.

Capítulo 3

Sistemas monofásicos e trifásicos

3.1 Introdução

A distribuição de energia elétrica em ambientes industriais fundamenta-se predominantemente na utilização de sistemas polifásicos, em especial o sistema trifásico, devido à sua elevada eficiência na transmissão de potência e ao desempenho superior no acionamento de máquinas elétricas (Chapman, 2012; Wildi, 2006).

Em instalações prediais e industriais, a escolha entre alimentação monofásica e trifásica não deve ser tratada apenas como uma diferença de quantidade de condutores ou como um critério de praticidade. Cada sistema apresenta comportamento próprio quanto à corrente, à potência instantânea, à queda de tensão, ao equilíbrio entre fases, ao acionamento de motores e à organização dos circuitos. Paralelamente, cada sistema apresenta custos de investimento, operação e manutenção distintos. Por essa razão, a compreensão das relações entre grandezas de fase e grandezas de linha é indispensável para as etapas posteriores de cálculo de corrente, levantamento de cargas, dimensionamento de condutores e seleção de dispositivos de proteção.

O objetivo deste capítulo consiste em estabelecer as distinções fundamentais entre sistemas monofásicos e trifásicos, apresentar suas relações matemáticas e analisar as configurações de conexão em estrela e triângulo. Também será discutida a importância do equilíbrio entre fases e da correta interpretação das diferenças de potencial elétrico disponíveis em redes usuais de baixa tensão.

3.2 Desenvolvimento teórico

A geração de energia elétrica em sistemas de potência ocorre predominantemente de forma senoidal. Em sistemas trifásicos, três diferenças de potencial elétrico são geradas com mesma amplitude e frequência, defasadas de 120° elétricos entre si. Esse valor corresponde a um terço de um ciclo completo, pois: $360^\circ/3 = 120^\circ$.

Essa defasagem está associada à construção das máquinas rotativas de geração de energia, nas quais os enrolamentos ou conjuntos de bobinas são dispostos mecanicamente de modo a produzir três grandezas alternadas simétricas. Assim, a separação elétrica de 120° não é arbitrária: ela decorre da própria concepção eletromecânica do gerador trifásico e da necessidade de produzir um sistema equilibrado.

Essas diferenças de potencial elétrico podem ser representadas por funções senoidais:

$$v_a(t) = V \cdot \sin(\omega t), \tag{3.1}$$
$$v_b(t) = V \cdot \sin(\omega t - 120^\circ), \tag{3.2}$$
$$v_c(t) = V \cdot \sin(\omega t - 240^\circ), \tag{3.3}$$

onde V é a amplitude em volt [V], ω é a frequência angular, associada à rotação da máquina elétrica, em radiano por segundo [rad/s], e t é o domínio temporal medido em segundo [s]. A Figura 3.1 ilustra essas funções.

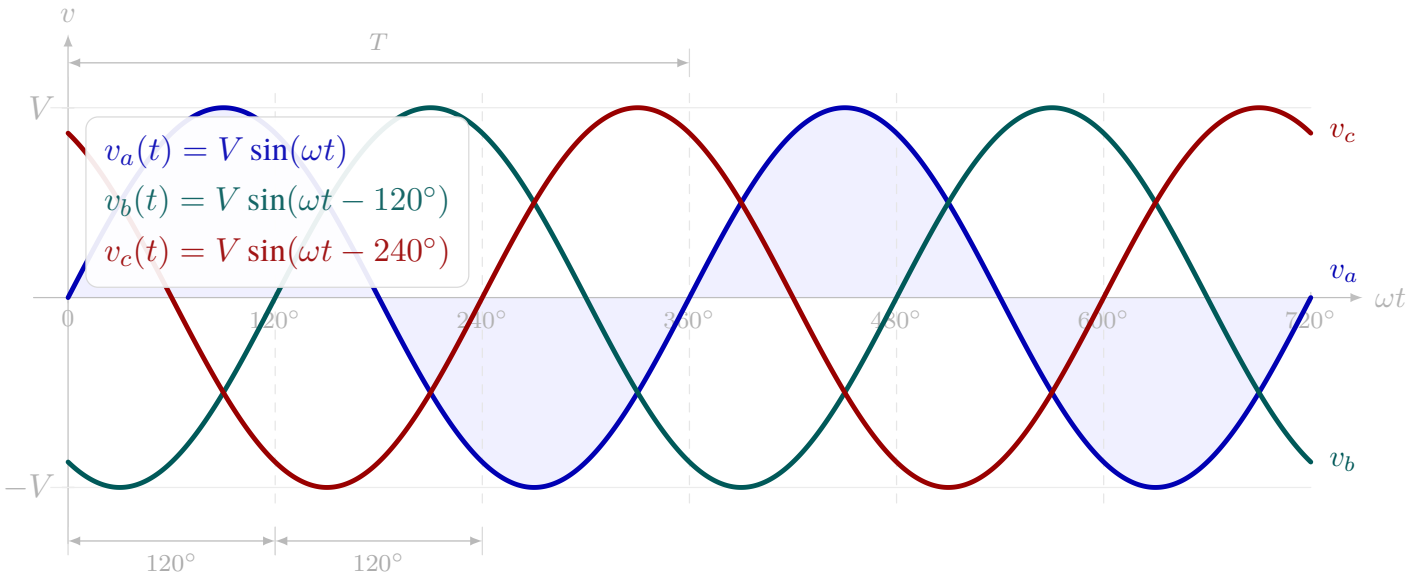

Figura 3.1: Potenciais elétricos trifásicos v_a, v_b e v_c, com mesma amplitude V e defasagem de 120° entre fases.

Nota

Ângulo de fase em fasores: Na notação fasorial, o símbolo $\angle$ indica o ângulo de fase de uma grandeza senoidal em relação a uma referência. Assim, a forma $V\angle\theta$ resume duas informações fundamentais: o módulo da grandeza, geralmente expresso em valor eficaz, e sua posição angular no plano fasorial.

A Figura 3.2 apresenta a representação fasorial dessas três diferenças de potencial elétrico, evidenciando a separação angular de 120° entre as fases. Note que a análise fasorial é aplicável de forma análoga para a corrente elétrica.

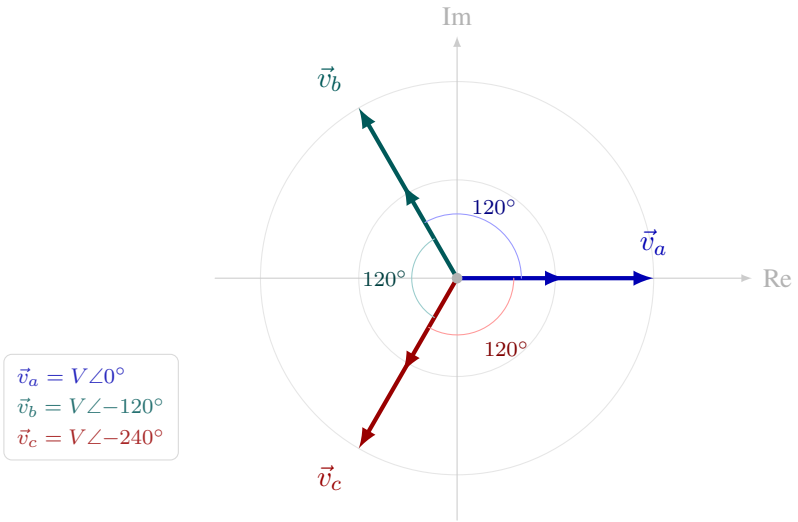

Figura 3.2: Diagrama fasorial das diferenças de potencial elétrico trifásicas, com mesma magnitude e defasagem angular de 120° entre fases consecutivas.

Saiba Mais

Leitura da notação fasorial: Por exemplo, $\vec{v}_a = V\angle 0°$ indica uma diferença de potencial elétrico fasorial com módulo V e fase de $0°$. Já $\vec{v}_b = V\angle -120°$ representa uma grandeza de mesmo módulo atrasada de $120°$ em relação à referência adotada. Essa notação é especialmente útil em sistemas trifásicos, pois permite comparar rapidamente as defasagens entre fases sem escrever as funções senoidais completas no domínio do tempo.

Importante

Defasagem de $120°$: A separação angular uniforme entre as fases garante simetria no sistema, permitindo a soma equilibrada das grandezas elétricas e a obtenção de potência total constante em cargas trifásicas balanceadas.

Neste capítulo, adota-se o símbolo θ para representar o ângulo de defasagem entre a diferença de potencial elétrico e a corrente, evitando ambiguidades com ϕ, tradicionalmente utilizado para indicar o ângulo do fator de potência.

3.2.1 Sistemas monofásicos

O sistema monofásico é caracterizado pela presença de uma única fase elétrica e, geralmente, de um condutor de retorno, denominado neutro. Trata-se da configuração mais simples em corrente alternada, amplamente utilizada em instalações residenciais, pequenos estabelecimentos comerciais e circuitos de baixa potência.

Definição

Neutro: O condutor neutro recebe esse nome por estar associado ao ponto comum de um sistema, normalmente o ponto estrela de um transformador ou gerador trifásico. Em condições equilibradas, esse ponto apresenta potencial próximo à referência do sistema. Por isso, o neutro permite disponibilizar diferenças de potencial elétrico entre fase e neutro, além de servir como caminho de retorno para correntes em circuitos monofásicos ou em sistemas desequilibrados.

Sua simplicidade construtiva e operacional é uma vantagem em aplicações de menor demanda. Entretanto, em ambientes industriais, o sistema monofásico apresenta limitações importantes, principalmente quando são consideradas cargas de maior potência, motores elétricos e longos alimentadores. Para uma mesma potência ativa, a alimentação monofásica tende a exigir correntes mais elevadas que a alimentação trifásica, aumentando perdas por efeito Joule, queda de tensão e solicitação térmica dos condutores.

Do ponto de vista matemático, a potência instantânea em um sistema monofásico senoidal pode ser escrita como:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = V \cdot I \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t - \theta), \tag{3.4}$$

onde ω representa a frequência angular do sinal elétrico, dada por $\omega = 2\pi \cdot f$, em que f é a frequência da rede elétrica, medida em hertz [Hz]. Em uma rede de 60 [Hz], por exemplo, a frequência angular é:

$$\omega = 2\pi \cdot 60 \approx 377\,[\text{rad/s}].$$

A frequência angular indica a velocidade com que o argumento da função senoidal varia no tempo. Em sistemas elétricos gerados por máquinas rotativas, essa grandeza está diretamente relacionada à velocidade de rotação do campo magnético da máquina síncrona. Assim, a frequência elétrica da rede não surge de forma arbitrária: ela decorre da rotação mecânica do gerador e do número de polos da máquina. De forma simplificada, quanto maior a velocidade de rotação ou o número de pares de polos, maior será a frequência elétrica produzida.

Utilizando identidades trigonométricas, obtém-se:

$$p(t) = \frac{V \cdot I}{2}\left[\cos\theta - \cos(2\omega t - \theta)\right]. \tag{3.5}$$

Observa-se que a potência apresenta um termo constante, proporcional a $\cos\theta$, e um termo oscilante com frequência angular 2ω. Isso significa que, em um sistema monofásico senoidal, a potência instantânea não permanece constante ao longo do tempo, mas pulsa duas vezes a frequência elétrica da rede.

Em sistemas ideais perfeitamente equilibrados, a corrente no neutro pode ser nula. Contudo, em instalações reais, especialmente quando há cargas monofásicas distribuídas de forma desigual entre as fases, o neutro pode conduzir corrente significativa. Por essa razão, sua presença e seu dimensionamento devem ser analisados tecnicamente.

Saiba Mais

Sistema monofásico sem condutores: Em termos físicos, não existe transmissão convencional de energia elétrica sem condutores. Sistemas chamados de *wireless power transfer* utilizam acoplamento eletromagnético ou campos oscilantes, porém apresentam:

- Baixa eficiência em longas distâncias;
- Limitações de potência;
- Aplicações restritas, como carregamento indutivo.

Assim, não substituem sistemas elétricos convencionais em instalações industriais.

A principal limitação do sistema monofásico pode ser observada na potência instantânea variável, o que resulta em pulsações de potência. Em máquinas elétricas, essas pulsações podem contribuir para vibrações, ruído e menor uniformidade de torque quando comparadas ao funcionamento trifásico.

3.2.2 Sistemas trifásicos

Em sistemas trifásicos equilibrados, a soma das potências instantâneas das três fases resulta em potência total constante. Para demonstrar essa propriedade, considerem-se três diferenças de potencial elétrico e três correntes senoidais equilibradas, com mesma frequência e defasagem angular de $120°$:

$$\begin{aligned} v_a(t) &= V \cdot \sin(\omega t), & i_a(t) &= I \cdot \sin(\omega t - \theta), \\ v_b(t) &= V \cdot \sin(\omega t - 120°), & i_b(t) &= I \cdot \sin(\omega t - 120° - \theta), \\ v_c(t) &= V \cdot \sin(\omega t - 240°), & i_c(t) &= I \cdot \sin(\omega t - 240° - \theta). \end{aligned}$$

Nessa representação, cada corrente mantém o mesmo ângulo de defasagem θ em relação à diferença de potencial elétrico da fase correspondente. Assim, considera-se uma carga trifásica balanceada, na qual as três fases possuem comportamento elétrico equivalente.

A potência instantânea total é dada por:

$$p_{total}(t) = p_a(t) + p_b(t) + p_c(t). \tag{3.6}$$

Para a fase a:

$$p_a(t) = V \cdot I \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t - \theta).$$

Aplicando a identidade trigonométrica:

$$\sin A \cdot \sin B = \frac{1}{2}\left[\cos(A - B) - \cos(A + B)\right],$$

obtém-se:

$$p_a(t) = \frac{V \cdot I}{2}\left[\cos\theta - \cos(2\omega t - \theta)\right].$$

De modo análogo, para as demais fases:

$$p_b(t) = \frac{V \cdot I}{2} \left[\cos\theta - \cos(2\omega t - 240^\circ - \theta)\right],$$

$$p_c(t) = \frac{V \cdot I}{2} \left[\cos\theta - \cos(2\omega t - 480^\circ - \theta)\right].$$

Somando as três parcelas:

$$p_{total}(t) = \frac{V \cdot I}{2} \left[3\cos\theta - (\cos(2\omega t - \theta) + \cos(2\omega t - 240^\circ - \theta) + \cos(2\omega t - 480^\circ - \theta))\right].$$

Os três termos cossenoidais oscilantes da expressão anterior possuem mesma amplitude e defasagem de 120° entre si. A soma desses termos é nula:

$$\cos(2\omega t - \theta) + \cos(2\omega t - 240^\circ - \theta) + \cos(2\omega t - 480^\circ - \theta) = 0.$$

Logo:

$$p_{total}(t) = \frac{3}{2} \cdot V \cdot I \cdot \cos\theta. \tag{3.7}$$

Ou seja, **não há termo oscilante** como no caso do sistema monofásico. Isso significa que:

- Não existem pulsações na potência total do sistema equilibrado;
- O torque em motores trifásicos tende a ser mais uniforme;
- Há menor esforço mecânico associado às oscilações de potência;
- A transmissão de energia ocorre de forma mais regular;
- A eficiência operacional é favorecida em aplicações industriais.

Definição

Sistema trifásico desequilibrado: Um sistema trifásico é considerado desequilibrado quando as três fases não apresentam condições elétricas simétricas entre si. Esse desequilíbrio pode ocorrer por diferenças nas amplitudes das diferenças de potencial elétrico, por defasagens angulares diferentes de 120°, por impedâncias de carga desiguais entre as fases ou pela distribuição irregular de cargas monofásicas em uma rede trifásica.
Como consequência, as correntes de fase podem assumir valores diferentes, podendo surgir corrente significativa no condutor neutro, aquecimento adicional em condutores e equipamentos, quedas de tensão desiguais, perdas elevadas e redução da eficiência do sistema. Em motores trifásicos, o desequilíbrio pode provocar aumento de temperatura, redução de torque, vibrações e diminuição da vida útil do equipamento.

3.2.3 Relações entre tensões de linha e de fase

Para compreender a relação entre diferença de potencial elétrico de linha e diferença de potencial elétrico de fase, é conveniente utilizar a representação fasorial. Até este ponto, as grandezas foram apresentadas como funções do tempo, como $v_a(t)$, $v_b(t)$ e $v_c(t)$. Essa forma mostra a variação senoidal das grandezas ao longo do tempo.

Na representação fasorial, uma senoide em regime permanente é representada por um vetor girante ou fasor, indicado por uma seta sobre a grandeza, como $\vec{V}_a$. Esse fasor conserva as informações essenciais da senoide: sua magnitude e seu ângulo de fase. Assim, em vez de escrever toda a função senoidal no tempo, representa-se a grandeza por um número complexo em forma polar. Essa simplificação facilita a análise de sistemas trifásicos, pois permite tratar diferenças de potencial elétrico como vetores no plano complexo.

Considere duas diferenças de potencial elétrico de fase representadas por fasores:

$$\vec{V}_a = V_F \angle 0^\circ \qquad \text{e} \qquad \vec{V}_b = V_F \angle -120^\circ.$$

A diferença de potencial elétrico de linha entre as fases a e b é obtida pela diferença vetorial entre os fasores de fase:

$$\vec{V}_{ab} = \vec{V}_a - \vec{V}_b.$$

Essa subtração é vetorial porque as grandezas senoidais possuem fase. Não basta subtrair apenas os valores numéricos das amplitudes, deve-se considerar também o ângulo entre elas. Convertendo $\vec{V}_b$ para forma cartesiana:

$$\vec{V}_b = V_F \cdot \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right).$$

Logo:

$$\vec{V}_{ab} = V_F \cdot \left(1 + \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right),$$

$$|\vec{V}_{ab}| = V_F \cdot \sqrt{\left(\frac{3}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2} = V_F \cdot \sqrt{3}.$$

Portanto:

$$V_L = \sqrt{3} \cdot V_F. \tag{3.8}$$

Importante

Fator $\sqrt{3}$: Resulta da diferença vetorial entre duas grandezas senoidais de mesma amplitude defasadas de 120°. Portanto, não é um fator arbitrário aplicado por convenção; surge da geometria do sistema trifásico equilibrado.

Essa relação vale apenas para sistemas trifásicos simétricos e equilibrados, ou muito próximos disso. Se as fases não apresentarem mesma amplitude, se os ângulos não forem exatamente separados de 120° ou se houver desequilíbrio significativo, a relação $V_L = \sqrt{3} \cdot V_F$ deixa de representar adequadamente o sistema real.

3.2.4 Relações de corrente

As relações entre corrente de linha e de fase dependem da forma de conexão da carga. Em sistemas trifásicos, as conexões usuais são a conexão em "estrela" (⅄) e a conexão em "triângulo" (Δ), também chamada "delta".

Nota

Outras conexões trifásicas: Além das ligações estrela e triângulo, existem conexões especiais utilizadas em aplicações específicas. A ligação *zig-zag*, por exemplo, é empregada principalmente em transformadores de aterramento e na criação ou estabilização de um ponto neutro. O *delta aberto*, também chamado *open-delta*, utiliza dois transformadores monofásicos para alimentar cargas trifásicas, normalmente em situações provisórias, contingenciais ou de menor potência. Já a ligação *Scott*, ou *Scott-T*, é usada para conversão entre sistemas trifásicos e bifásicos. Em projetos prediais e industriais, entretanto, as conexões fundamentais a serem dominadas são a estrela e o triângulo, pois aparecem com maior frequência em motores, transformadores e sistemas de distribuição.

A notação simbólica "⅄" é utilizada para reforçar visualmente a ideia de um ponto comum de ligação entre as três fases, enquanto "Δ" representa a ligação fechada entre os três enrolamentos ou impedâncias. Na literatura técnica e em placas de motores, também são comuns as notações "Y" para estrela e "Δ" para triângulo.

A Figura 3.3 apresenta as configurações de ligação em estrela e triângulo, destacando a diferença entre grandezas de "linha" (condutores externos de alimentação) e grandezas de "fase" (ramo elétrico interno).

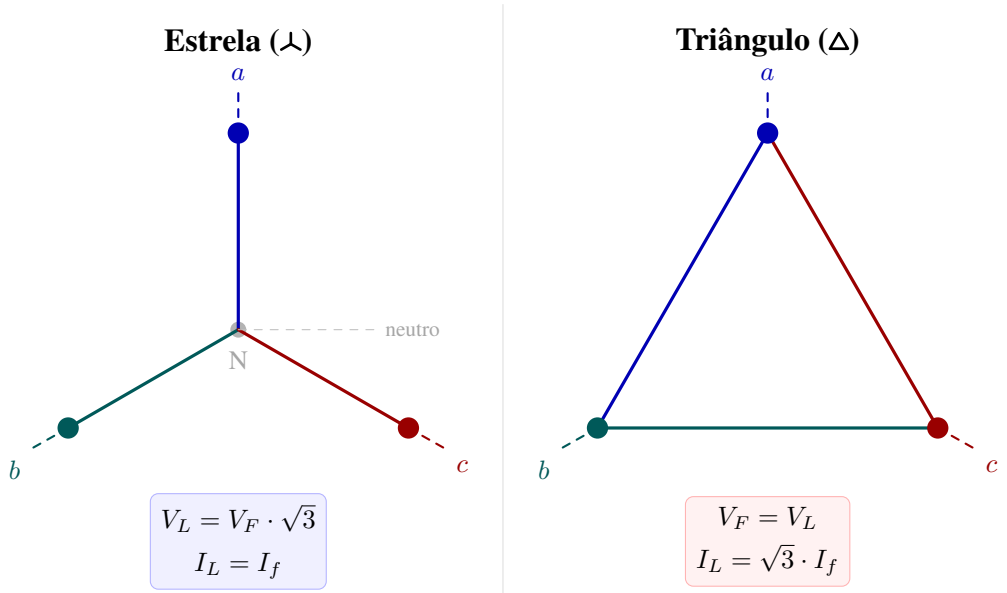

Figura 3.3: Configurações de conexão em estrela (⅄) e em triângulo (Δ), indicando as relações entre diferença de potencial elétrico e correntes de linha e de fase. Note que não existe "neutro" na conexão em triângulo, pois não há ponto comum entre as fases. Alguns autores explicitam uma impedância (elemento de carga) ou uma fonte (elemento de alimentação) fase-neutro na conexão em estrela e fase-fase na conexão em triângulo.

Na conexão em estrela, cada impedância da carga é ligada entre uma fase e o ponto comum da estrela. Nesse caso, a corrente que circula em cada fase da carga é a mesma corrente que percorre o condutor de linha correspondente:

$$I_L = I_F. \tag{3.9}$$

Na conexão em triângulo, cada impedância da carga é ligada entre duas fases. Nesse caso, a corrente de linha resulta da soma vetorial das correntes em dois ramos do triângulo, levando à relação:

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_F. \tag{3.10}$$

As Equações 3.9 e 3.10 não são válidas para cargas desequilibradas sem análise adicional. Em cargas desequilibradas, a análise deve ser realizada fase por fase, com tratamento vetorial das grandezas elétricas.

3.2.5 Configurações de conexão

As configurações de conexão em estrela e em triângulo são utilizadas para adequar os enrolamentos ou impedâncias da carga às diferenças de potencial elétrico disponíveis na rede. A escolha da ligação influencia diretamente a diferença de potencial elétrico aplicada a cada fase da carga, a corrente nos condutores de linha e a possibilidade de utilização do condutor neutro.

A Tabela 3.1 resume as principais relações entre grandezas de linha e de fase nas conexões em estrela e em triângulo.

Tabela 3.1: Comparativo entre conexões estrela e triângulo

Característica	**Estrela (⅄)**	**Triângulo (△)**
Tensão na linha:	$V_L = \sqrt{3} \cdot V_f$	$V_L = V_f$
Corrente na linha:	$I_L = I_f$	$I_L = \sqrt{3} \cdot I_f$
Neutro:	Disponível quando acessível.	Não disponível diretamente.

Nota

Aplicações da conexão em estrela: A conexão em estrela é frequentemente utilizada quando se deseja disponibilizar o condutor neutro, alimentar cargas mistas ou reduzir a diferença de potencial elétrico aplicada a cada enrolamento. Essa característica é importante em redes que atendem simultaneamente cargas monofásicas e trifásicas, pois permite obter diferenças de potencial elétrico entre fase e neutro e entre fases.
Em motores, a conexão em estrela também pode ser empregada em determinadas estratégias de partida, como a *partida estrela-triângulo*, desde que o motor, a rede e o dispositivo de comando sejam compatíveis com esse método.

Nota

Aplicações da conexão em triângulo: A conexão em triângulo é comum na operação nominal de motores e em cargas trifásicas projetadas para receber diretamente a diferença de potencial elétrico de linha em cada enrolamento. Nessa configuração, cada impedância da carga fica ligada entre duas fases, de modo que a diferença de potencial elétrico aplicada ao enrolamento corresponde à diferença de potencial elétrico entre linhas.
Por esse motivo, a conexão em triângulo deve ser compatível com a placa de identificação do equipamento e com a diferença de potencial elétrico disponível na rede. Em motores trifásicos, uma ligação inadequada pode causar sobrecorrente, aquecimento excessivo, baixo desempenho mecânico ou dano aos enrolamentos, especialmente quando a conexão escolhida não corresponde à diferença de potencial elétrico nominal indicada pelo fabricante.

A escolha entre estrela e triângulo não deve ser feita apenas pela conveniência da ligação. Deve-se verificar a placa do equipamento, a diferença de potencial elétrico da rede, a corrente nominal, o método de partida, a disponibilidade de neutro e as recomendações do fabricante. Uma ligação inadequada pode provocar baixo torque, sobrecorrente, aquecimento excessivo ou dano aos enrolamentos.

Exemplo

Caso 1: Em uma rede $380/220\,[\mathrm{V}]$, normalmente interpreta-se que:

- $380\,[\mathrm{V}]$ corresponde à diferença de potencial elétrico entre duas fases;
- $220\,[\mathrm{V}]$ corresponde à diferença de potencial elétrico entre fase e neutro;
- Cargas monofásicas usuais podem ser ligadas entre fase e neutro, utilizando $220\,[\mathrm{V}]$;
- Cargas trifásicas podem ser ligadas entre as três fases, utilizando $380\,[\mathrm{V}]$ entre linhas.

Como exemplo, circuitos de iluminação e tomadas de uso geral podem ser distribuídos entre fase e neutro, procurando equilibrar as cargas entre as fases. Já motores trifásicos de maior potência podem ser ligados diretamente às três fases, desde que sua placa de identificação indique compatibilidade com a diferença de potencial elétrico disponível e com o tipo de conexão dos enrolamentos.
Em uma pequena oficina, por exemplo, pode-se alimentar a iluminação em $220\,[\mathrm{V}]$ entre fase e neutro, tomadas monofásicas também em $220\,[\mathrm{V}]$ e um motor trifásico em $380\,[\mathrm{V}]$ entre fases. Essa separação exige atenção ao quadro de cargas, pois as cargas monofásicas devem ser distribuídas de forma equilibrada entre as fases **R**, **S** e **T** para reduzir corrente no neutro e evitar desequilíbrios excessivos.

Exemplo

Caso 2: Em uma rede $220/127\,[\mathrm{V}]$, comum em algumas regiões, a interpretação é análoga ao exemplo anterior:

- $220\,[\mathrm{V}]$ corresponde à diferença de potencial elétrico entre fases;
- $127\,[\mathrm{V}]$ corresponde à diferença de potencial elétrico entre fase e neutro;
- Cargas monofásicas de baixa potência podem ser alimentadas em $127\,[\mathrm{V}]$ entre fase e neutro;
- Cargas trifásicas compatíveis podem ser alimentadas em $220\,[\mathrm{V}]$ entre fases.

Esse exemplo evidencia a importância de compreender a relação entre diferença de potencial elétrico de linha e de fase. Um equipamento monofásico projetado para $220\,[\mathrm{V}]$, por exemplo, não deve ser ligado entre fase e neutro em uma rede $220/127\,[\mathrm{V}]$, pois receberia apenas $127\,[\mathrm{V}]$. Da mesma forma, um equipamento trifásico deve ser compatível com a diferença de potencial elétrico entre fases disponível na instalação.
Essa análise também é importante para motores trifásicos com placa $220/380\,[\mathrm{V}]$. Em muitos motores desse tipo, a conexão em triângulo é utilizada quando a rede fornece $220\,[\mathrm{V}]$ entre fases, enquanto a conexão em estrela é utilizada quando a rede fornece $380\,[\mathrm{V}]$ entre fases. Isso ocorre porque, na conexão em estrela, cada enrolamento recebe uma diferença de potencial elétrico menor que a diferença de potencial elétrico de linha; já na conexão em triângulo, cada enrolamento fica submetido diretamente à diferença de potencial elétrico entre fases.

Aviso

Ligação incorreta em sistemas trifásicos: Antes de conectar motores trifásicos, verifique as tensões de linha e fase na placa do equipamento. Erros de ligação (estrela/triângulo) causam sobrecorrente, perda de torque ou queima do motor.

3.3 Resumo do capítulo

Neste capítulo, analisaram-se as diferenças entre sistemas monofásicos e trifásicos. Enquanto o monofásico destaca-se pela simplicidade em cargas de menor potência, o trifásico oferece transmissão mais uniforme de potência, melhor aproveitamento de condutores e desempenho superior no acionamento de motores.

Apresentou-se a origem da defasagem de $120°$ em sistemas trifásicos equilibrados e sua representação senoidal e fasorial, ferramenta que facilitou a análise vetorial de grandezas. Também discutiu-se a função do condutor neutro em circuitos monofásicos derivados e em cenários de desequilíbrio entre fases.

Demonstrou-se que a potência instantânea monofásica possui uma parcela oscilante em $2 \cdot \omega$, gerando pulsações perceptíveis em equipamentos de maior consumo. Em contrapartida, no sistema trifásico equilibrado, a soma das potências elimina os termos oscilantes, resultando em uma potência total contínua e constante, o que beneficia processos industriais e máquinas elétricas.

Foram deduzidas as relações de tensão de linha e de fase, evidenciando que o fator $\sqrt{3}$ decorre da geometria de fasores defasados em $120°$. Analisaram-se também as correntes nas conexões estrela e triângulo, mostrando como a escolha da ligação afeta a tensão nos enrolamentos, a corrente de linha e o uso do neutro.

Embora existam configurações especiais para transformadores e aterramentos, destacou-se que as conexões fundamentais para projetos prediais e industriais usuais são a estrela e o triângulo.

Por fim, discutiram-se aplicações em redes de baixa tensão e a importância de interpretar os dados de placas de motores trifásicos. Conclui-se que dominar as grandezas de linha e fase, o equilíbrio do sistema e as conexões elétricas é indispensável para o dimensionamento, proteção e elaboração segura de projetos.

Capítulo 4

Cálculo de corrente elétrica

4.1 Introdução

O cálculo da corrente elétrica constitui uma etapa analítica fundamental para o dimensionamento de condutores e dispositivos de proteção em instalações industriais (ABNT NBR 5410, 2004; Nilsson e Riedel, 2020). A partir da determinação das potências das cargas, dos níveis de diferença de potencial elétrico do sistema e do fator de potência, torna-se possível quantificar a intensidade do fluxo de carga elétrica que percorre os circuitos.

Este capítulo apresenta as formulações matemáticas necessárias para a determinação da corrente em sistemas monofásicos e trifásicos equilibrados, estabelecendo as bases para a seleção técnica de componentes elétricos que operem dentro dos limites térmicos, elétricos e de segurança exigidos pelas normas técnicas.

Além do cálculo numérico, será enfatizada a interpretação física da corrente elétrica, especialmente sua relação com o aquecimento dos condutores, com o valor eficaz em corrente alternada e com o comportamento transitório de cargas industriais, como motores elétricos.

4.2 Desenvolvimento teórico

A corrente elétrica eficaz em sistemas de corrente alternada está diretamente relacionada à potência solicitada pela carga e inversamente relacionada à diferença de potencial elétrico aplicada e ao fator de potência do sistema (Alexander e Sadiku, 2017). Para fins de projeto, define-se a **corrente de projeto** (I_B), conforme nomenclatura adotada pela **ABNT NBR 5410**, como a corrente que o circuito deve conduzir em regime permanente de operação.

Definição

Corrente de projeto (I_B): Define-se como a corrente elétrica que o circuito deve conduzir em condições normais de operação, sendo utilizada como referência para o dimensionamento de condutores e dispositivos de proteção.

Essa corrente não deve ser confundida com correntes transitórias, como correntes de partida de motores, correntes de magnetização de transformadores ou correntes de energização de capacitores. Em geral, o dimensionamento térmico dos condutores é baseado na corrente de regime permanente, enquanto a seleção dos dispositivos de proteção deve considerar tanto a corrente permanente quanto os fenômenos transitórios associados à carga.

4.2.1 Valor eficaz (RMS)

Em sistemas de corrente alternada, a corrente varia ao longo do tempo. Para fins de análise e dimensionamento, utiliza-se o valor eficaz, definido formalmente como o valor RMS, do inglês *Root Mean Square*. Esse valor representa a corrente contínua equivalente que produziria o mesmo aquecimento em uma resistência.

Matematicamente, trata-se da norma Euclidiana (*norma-p* com $p = 2$). Para $p = 1$, obtém-se a média aritmética, que é nula no caso de um sinal senoidal. Assim, o valor eficaz de uma corrente periódica $i(t)$ é dado por:

$$I_{\text{rms}} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T i^p(t)\, dt \right)^{\frac{1}{p}}, \quad \text{com } p = 2, \tag{4.1}$$

onde:

- I_{rms} é o valor eficaz da corrente elétrica, em ampere [A];
- $i(t)$ é o valor instantâneo da corrente elétrica, em ampere [A], não necessariamente senoidal, mas periódica;
- T é o período da forma de onda, em segundo [s]. Este periodo é inverso da frequência do sinal $i(t)$.

Embora a expressão envolva cálculo integral, sua interpretação pode ser compreendida de forma acessível. O procedimento matemático possui três etapas principais. Primeiro, a corrente instantânea é elevada ao quadrado, pois o aquecimento produzido por uma corrente em uma resistência depende de $i^2(t)$. Essa etapa também torna positivos os valores negativos da corrente alternada, evitando que semiciclos positivos e negativos se anulem.

Em seguida, calcula-se uma média ao longo de um período completo da forma de onda. Essa média representa o efeito térmico médio produzido pela corrente variável. Por fim, extrai-se a raiz quadrada do resultado para retornar à unidade original da corrente, isto é, ampere [A]. O valor eficaz expressa dissipação térmica equivalente.

A Figura 4.1 apresenta uma interpretação gráfica do valor I_{rms}, indicando que esse valor corresponde a uma corrente contínua equivalente do ponto de vista térmico. Um raciocínio semelhante é aplicado para V_{rms}.

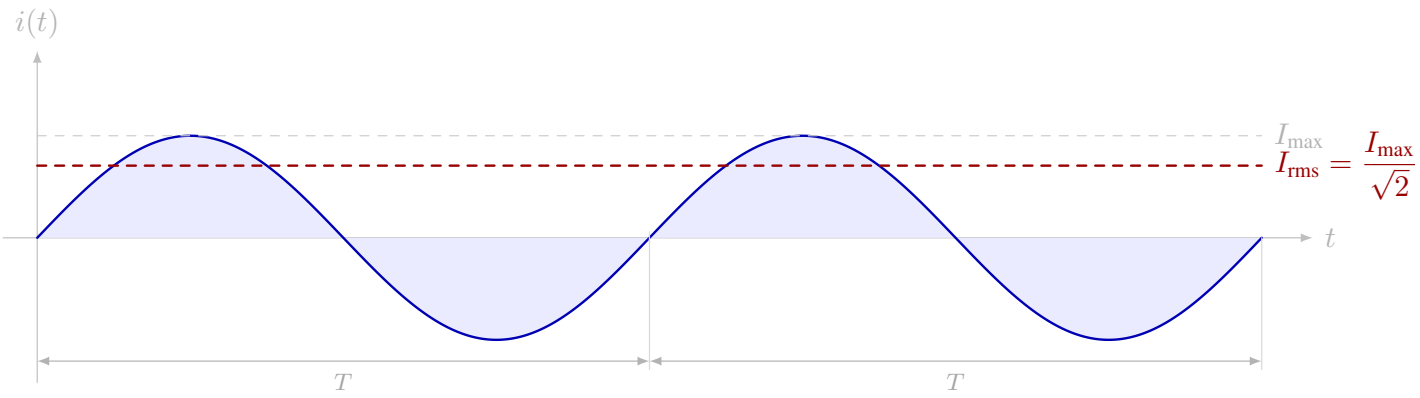

Figura 4.1: Representação do valor eficaz (RMS) de uma corrente alternada senoidal: a linha tracejada indica o valor contínuo equivalente que produziria o mesmo efeito térmico em uma resistência.

Essa relação é válida para sinais senoidais ideais. Para formas de onda distorcidas, como aquelas produzidas por cargas não lineares, o valor eficaz deve ser determinado pela definição geral da Equação 4.1 ou por instrumentos capazes de medir verdadeiro RMS, encontrados comercialmente sob a denominação *True RMS*.

! Importante

Importância do valor eficaz: Todos os cálculos de dimensionamento elétrico em corrente alternada são realizados com valores eficazes, pois estes representam corretamente os efeitos térmicos da corrente nos condutores. Por essa razão, quando se informa uma rede de 220 [V] ou 380 [V], esses valores são normalmente valores eficazes.

4.2.2 Relação entre corrente e aquecimento

O aquecimento dos condutores é regido pelo efeito Joule. Nesse contexto, a potência P representa a potência dissipada em forma de calor no condutor, e não potência útil convertida em trabalho mecânico ou em outro efeito desejado. Para um condutor ôhmico em regime permanente, essa potência dissipada pode ser expressa por:

$$P = R \cdot I^2 \tag{4.2}$$

onde:

- P é a potência dissipada por efeito Joule, em watt [W];
- R é a resistência elétrica do condutor, em ohm [Ω];
- I é a corrente elétrica eficaz, em ampere [A].

Essa expressão mostra que a potência dissipada cresce com o quadrado da corrente. Assim, se a corrente dobra, a potência dissipada no condutor aumenta quatro vezes, desde que a resistência permaneça constante. Esse comportamento justifica a atenção dada ao cálculo da corrente em projetos elétricos, pois pequenas elevações de corrente podem produzir aumento significativo de aquecimento.

A Figura 4.2 ilustra essa relação quadrática entre corrente elétrica e potência dissipada por efeito Joule.

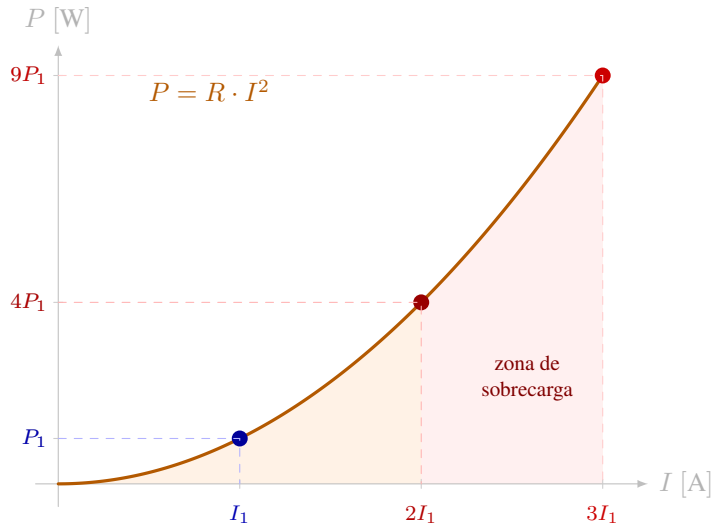

Figura 4.2: Relação quadrática entre corrente elétrica e potência dissipada por efeito Joule.

No entanto, a aplicação direta da expressão $P = R \cdot I^2$ pressupõe algumas condições. Em primeiro lugar, considera-se que a resistência do condutor é conhecida e aproximadamente constante na faixa de operação analisada. Na prática, a resistência dos metais aumenta com a temperatura. Portanto, em situações de aquecimento intenso, deve-se considerar que R pode variar durante o funcionamento.

Também é necessário cuidado em casos de correntes muito elevadas, como curtos-circuitos. Nessas condições, o fenômeno é transitório, a temperatura pode variar rapidamente e a análise exige critérios específicos de suportabilidade térmica, energia passante e atuação dos dispositivos de proteção. Assim, a expressão do efeito Joule continua sendo a base física do aquecimento, mas o dimensionamento não deve ser feito apenas por uma aplicação simples da fórmula em regime permanente.

Outra limitação ocorre em materiais ou dispositivos com comportamento não linear, nos quais a relação entre corrente e diferença de potencial elétrico não é proporcional. Componentes semicondutores, lâmpadas de descarga, varistores, arcos elétricos e alguns materiais submetidos a temperaturas elevadas podem apresentar resistência variável com a corrente, com a temperatura ou com o campo elétrico aplicado. Nesses casos, a análise deve considerar o modelo elétrico específico do componente.

Aviso

Limites da expressão do efeito Joule: A expressão $P = R \cdot I^2$ é adequada para condutores ôhmicos em regime permanente ou em aproximações de projeto. Em curtos-circuitos, transitórios severos, aquecimento intenso ou materiais não lineares, devem ser considerados modelos complementares, dados de fabricante e critérios normativos específicos.

A potência dissipada é proporcional ao quadrado da corrente, o que implica que pequenas variações na corrente resultam em elevações significativas na temperatura do condutor. Esse fenômeno justifica a necessidade de dimensionamento adequado dos condutores, conforme critérios estabelecidos em normas técnicas.

4.2.3 Cálculo de corrente em sistemas monofásicos

Em sistemas monofásicos de corrente alternada senoidal, a potência ativa é expressa por:

$$P_{\mathbf{1F}} = V_F \cdot I_F \cdot \cos\phi. \tag{4.3}$$

Isolando-se a corrente, obtém-se:

$$I_F = \frac{P_{\mathbf{1F}}}{V_F \cdot \cos\phi}, \tag{4.4}$$

onde:

- $P_{\mathbf{1F}}$ é a potência ativa monofásica, em watt [W], fornecida por uma fase ou por um ramo de uma conexão estrela (⅄), devido à presença do condutor neutro;
- V_F é a diferença de potencial elétrico eficaz entre a fase e o neutro, em volt [V] (RMS);
- I_F é a corrente elétrica eficaz entre a fase e o neutro, em ampere [A] (RMS);
- $\cos\phi$ é o fator de potência da carga.

Essa expressão é amplamente utilizada na determinação da corrente de projeto em circuitos de baixa tensão (Nilsson e Riedel, 2020). Em cargas resistivas, como aquecedores, chuveiros elétricos e resistências industriais, pode-se adotar $\cos\phi \approx 1$. Em cargas indutivas, como motores e transformadores, o fator de potência deve ser considerado, pois sua redução aumenta a corrente necessária para a mesma potência ativa.

Exemplo

Cálculo de corrente monofásica: Considere um aquecedor de 2200 [W] alimentado em 220 [V], com $\cos\phi = 1$:

$$I = \frac{2200}{220 \cdot 1} = 10\,[\text{A}].$$

Esse valor representa a corrente de projeto do circuito em regime permanente. Como se trata de uma carga predominantemente resistiva, o fator de potência pode ser considerado aproximadamente unitário.

4.2.4 Cálculo de corrente em sistemas trifásicos

Em sistemas trifásicos equilibrados, a potência total é distribuída entre as três fases. A expressão da potência ativa é dada por:

$$P_{\mathbf{3F}} = \sqrt{3} \cdot V_L I_L \cdot \cos\phi.$$

A corrente de linha é determinada por:

$$I_L = \frac{P_{\mathbf{3F}}}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\phi}, \tag{4.5}$$

onde:

- $P_{\mathbf{3F}}$ é a potência ativa trifásica, em watt [W];
- V_L é a diferença de potencial elétrico de linha, entre duas fases, em volt [V] (RMS);
- I_L é a corrente de linha, em ampere [A] (RMS);
- $\cos\phi$ é o fator de potência da carga trifásica.

Essas relações são fundamentais no dimensionamento de sistemas prediais e industriais, permitindo a correta base de cálculo para a seleção de cabos e dispositivos de proteção (Chapman, 2012).

Exemplo

Cálculo de corrente trifásica: Considere um motor trifásico com potência ativa de $5{,}5$ [kW], alimentado por uma rede de 380 [V], com fator de potência $\cos\phi = 0{,}85$.
Inicialmente, converte-se a potência para watt:

$$P_{\mathbf{3F}} = 5{,}5\,[\text{kW}] = 5500\,[\text{W}].$$

A corrente de linha é dada por:

$$I_L = \frac{P_{\mathbf{3F}}}{\sqrt{3}\cdot V_L \cdot \cos\phi}.$$

Substituindo os valores:

$$I_L = \frac{5500}{\sqrt{3}\cdot 380 \cdot 0{,}85},$$

$$I_L \approx 9{,}84\,[\text{A}].$$

Assim, a corrente de linha do motor em regime permanente é aproximadamente $9{,}84$ [A]. Esse valor deve ser utilizado como referência inicial para o dimensionamento do circuito, observando-se posteriormente os critérios de capacidade de condução, queda de tensão, método de instalação e proteção.

4.2.5 Corrente de partida

Em cargas industriais, especialmente motores elétricos, a corrente solicitada no instante da partida pode ser significativamente superior à corrente nominal. Essa corrente transitória, denominada corrente de partida, pode atingir valores entre 5 e 8 vezes a corrente nominal do equipamento, dependendo do tipo de motor, do método de partida e das características da carga mecânica acoplada (Chapman, 2012).

Embora o dimensionamento de condutores seja realizado com base na corrente de regime permanente, os dispositivos de proteção devem ser selecionados considerando esse comportamento transitório. Caso contrário, podem ocorrer disparos indevidos durante a partida, mesmo quando o circuito está operando de forma normal.

Na prática de projeto, a corrente de partida deve ser analisada em conjunto com a curva de atuação dos dispositivos de proteção, o tempo de aceleração do motor, a queda de tensão admissível durante a partida e a suportabilidade térmica dos condutores. Em instalações com vários motores, também é necessário verificar se partidas simultâneas ou sucessivas podem provocar afundamentos de diferença de potencial elétrico, perturbações em outros equipamentos ou sobrecarga temporária no sistema de alimentação.

Aviso

Corrente elevada: A não consideração da corrente de partida pode resultar em desligamentos indevidos de disjuntores ou na escolha inadequada de dispositivos de proteção. Em circuitos de motores, deve-se compatibilizar a proteção contra sobrecarga, a proteção contra curto-circuito e a capacidade de suportar correntes transitórias de partida.

4.3 Resumo do capítulo

Neste capítulo, foi demonstrado que o cálculo da corrente elétrica é uma etapa essencial para o dimensionamento de condutores e dispositivos de proteção em instalações elétricas. A corrente de projeto I_B foi apresentada como a corrente que o circuito deve conduzir em condições normais de operação, servindo como referência inicial para a análise térmica dos condutores e para a seleção dos dispositivos de proteção.

Foi discutida a importância do valor eficaz, ou RMS, em sistemas de corrente alternada. Mostrou-se que esse valor representa a corrente contínua equivalente capaz de produzir o mesmo efeito térmico em uma resistência, justificando sua utilização em cálculos de dimensionamento. Também foi destacada a diferença entre sinais senoidais ideais, nos quais $I = I_{\text{max}}/\sqrt{2}$, e formas de onda distorcidas, nas quais o valor eficaz deve ser obtido pela definição geral ou por instrumentos do tipo "True RMS".

O capítulo também analisou a relação entre corrente elétrica e aquecimento dos condutores por meio do efeito Joule. Verificou-se que a potência dissipada em forma de calor é proporcional ao quadrado da corrente, conforme $P = R \cdot I^2$. Essa relação explica por que pequenas elevações de corrente podem produzir aumentos significativos de aquecimento, perdas elétricas e solicitação térmica dos componentes. Também foram discutidas as limitações dessa expressão em situações de curtos-circuitos, transitórios severos, aquecimento intenso e materiais não lineares.

Foram apresentadas as expressões para o cálculo da corrente em sistemas monofásicos e trifásicos equilibrados. No caso monofásico, a corrente foi obtida a partir da potência ativa, da diferença de potencial elétrico eficaz e do fator de potência. No caso trifásico, foi utilizada a relação entre potência ativa total, diferença de potencial elétrico de linha, corrente de linha e fator de potência, permitindo determinar a corrente de regime permanente de cargas industriais, como motores elétricos.

Por fim, foi destacada a importância das correntes transitórias de partida, especialmente em motores elétricos. Embora o dimensionamento térmico dos condutores seja baseado na corrente de regime permanente, os dispositivos de proteção devem ser selecionados considerando também correntes de partida, correntes de magnetização e demais fenômenos transitórios. Conclui-se que o correto cálculo da corrente elétrica é indispensável para garantir segurança, eficiência, continuidade de serviço e coerência técnica no projeto de instalações elétricas.

Capítulo 5

Cargas industriais e motores elétricos

5.1 Introdução

A caracterização das cargas elétricas constitui etapa preliminar essencial para a elaboração de projetos elétricos prediais e industriais (ABNT NBR 5410, 2004; Wildi, 2006). Em instalações industriais, parcela significativa da energia consumida está associada a equipamentos eletromecânicos, especialmente motores elétricos, os quais apresentam comportamento predominantemente indutivo, corrente de partida elevada e influência direta no fator de potência da instalação. Em instalações prediais, embora o comportamento indutivo não seja predominante, ele também está presente em cargas como motores de pequenos equipamentos, sistemas de climatização, bombas, ventiladores e transformadores.

A correta identificação do tipo de carga permite estimar a corrente elétrica, avaliar o fator de potência, prever efeitos térmicos nos condutores, selecionar dispositivos de proteção e analisar possíveis impactos na qualidade da energia. Assim, antes do dimensionamento propriamente dito, deve-se compreender como cada carga se comporta eletricamente e quais grandezas devem ser extraídas de catálogos, placas de identificação ou memoriais de projeto.

O objetivo deste capítulo consiste em apresentar a classificação das cargas industriais e aprofundar o estudo do motor de indução trifásico, analisando os parâmetros presentes em sua placa de identificação. Busca-se capacitar o discente na interpretação de dados técnicos essenciais para o dimensionamento de circuitos elétricos.

5.2 Desenvolvimento teórico

As cargas elétricas industriais apresentam comportamentos distintos conforme sua natureza físico-elétrica, influenciando diretamente o fator de potência, a corrente elétrica, a forma de onda e a qualidade da energia do sistema (Alexander e Sadiku, 2017). Em termos gerais, uma carga pode converter energia elétrica em calor, movimento, luz, campo magnético, campo elétrico ou em uma combinação desses efeitos.

Do ponto de vista do projeto elétrico, a carga não deve ser analisada apenas pela potência nominal, pois essa informação pode estar associada a grandezas de naturezas diferentes, como potência ativa [W], potência aparente [VA], potência reativa [VAr], potência mecânica [cv] ou [HP] e potência térmica [Btu] ou [W]. É necessário considerar também a diferença de potencial elétrico de alimentação, a frequência da rede, a quantidade de fases, o tipo de ligação elétrica, o fator de potência, o rendimento, a corrente nominal, a corrente de partida, a queda de diferença de potencial elétrico admissível, o comprimento do circuito, o método de instalação dos condutores, a temperatura ambiente, o regime de operação, o tipo de isolação e outras variáveis de projeto.

5.2.1 Classificação das cargas industriais

As cargas podem ser classificadas conforme sua natureza físico-elétrica em categorias como resistivas, capacitivas, indutivas e não lineares. Essa classificação é útil porque cada tipo de carga produz efeitos diferentes sobre a corrente elétrica, sobre o fator de potência e sobre o dimensionamento dos circuitos.

A Tabela 5.1 apresenta uma síntese das principais categorias de cargas industriais e exemplos típicos de aplicação.

Tabela 5.1: Classificação das cargas elétricas industriais conforme sua natureza físico-elétrica

Categoria	**Natureza**	**Exemplos**
Resistivas	Lineares, com $\cos\phi \approx 1$. A coorente e s diferença de potencial estão práticamente em fase.	Fornos resistivos, estufas, aquecedores e resistências elétricas.
Capacitivas	Lineares, com corrente adiantada em relação à diferença de potencial elétrico.	Bancos de capacitores, filtros capacitivos e circuitos de correção de fator de potência.
Indutivas	Lineares, com $\cos\phi < 1$ e corrente atrasada em relação à diferença de potencial elétrico.	Motores de indução, transformadores, contatores e reatores.
Não lineares	Corrente não senoidal, aproximações senoidais com presença de harmônicas.	Inversores de frequência, retificadores, fontes chaveadas e conversores eletrônicos.

Nota

Harmônicas: Em sistemas ideais de corrente alternada, espera-se que a diferença de potencial elétrico e a corrente apresentem forma senoidal. Em cargas não lineares, entretanto, a corrente pode ser deformada, mesmo quando a diferença de potencial elétrico da rede permanece aproximadamente senoidal. Isso ocorre porque a relação entre diferença de potencial elétrico e corrente não é proporcional ao longo de todo o ciclo da forma de onda.
Essa deformação pode ser interpretada como a presença de componentes de frequência múltipla da frequência fundamental. Em uma rede de 60 [Hz], por exemplo, a terceira harmônica possui frequência de 180 [Hz], a quinta harmônica possui frequência de 300 [Hz] e assim sucessivamente. Essas componentes se somam à componente fundamental e alteram o valor eficaz da corrente, mesmo quando a potência ativa útil não aumenta na mesma proporção.
As harmônicas podem produzir aquecimento adicional em condutores e transformadores, aumento de perdas, interferências eletromagnéticas, circulação de correntes indesejadas no condutor neutro e funcionamento inadequado de dispositivos de proteção em determinadas condições. Por esse motivo, instalações com grande quantidade de equipamentos eletrônicos, inversores de frequência, fontes chaveadas, retificadores ou sistemas de iluminação eletrônica devem ser analisadas com atenção quanto à qualidade da energia elétrica.

Do ponto de vista elétrico, a relação entre diferença de potencial elétrico $v(t)$ e corrente $i(t)$ define o comportamento da carga. Essa relação permite compreender se a corrente acompanha a forma de onda da diferença de potencial elétrico, se há defasagem angular ou se existem distorções significativas.

- **Cargas resistivas:** $v(t)$ e $i(t)$ estão em fase. Nessa condição, a potência elétrica é convertida predominantemente em calor ou trabalho útil, e o fator de potência é aproximadamente unitário.
- **Cargas capacitivas:** a corrente se adianta em relação à diferença de potencial elétrico. Esse comportamento ocorre porque a carga armazena energia temporariamente em campo elétrico. Em instalações industriais, elementos capacitivos são frequentemente utilizados em bancos de capacitores para correção do fator de potência, compensando parte da potência reativa associada a cargas indutivas.
- **Cargas indutivas:** a corrente atrasa em relação à diferença de potencial elétrico. Esse comportamento ocorre porque parte da energia fornecida pela rede é temporariamente armazenada em campos magnéticos.
- **Cargas não lineares:** a corrente não segue necessariamente a mesma forma senoidal da diferença de potencial elétrico. Esse comportamento é comum em equipamentos com eletrônica de potência.

A Figura 5.1 compara qualitativamente o comportamento de $v(t)$ e $i(t)$ em diferentes tipos de cargas.

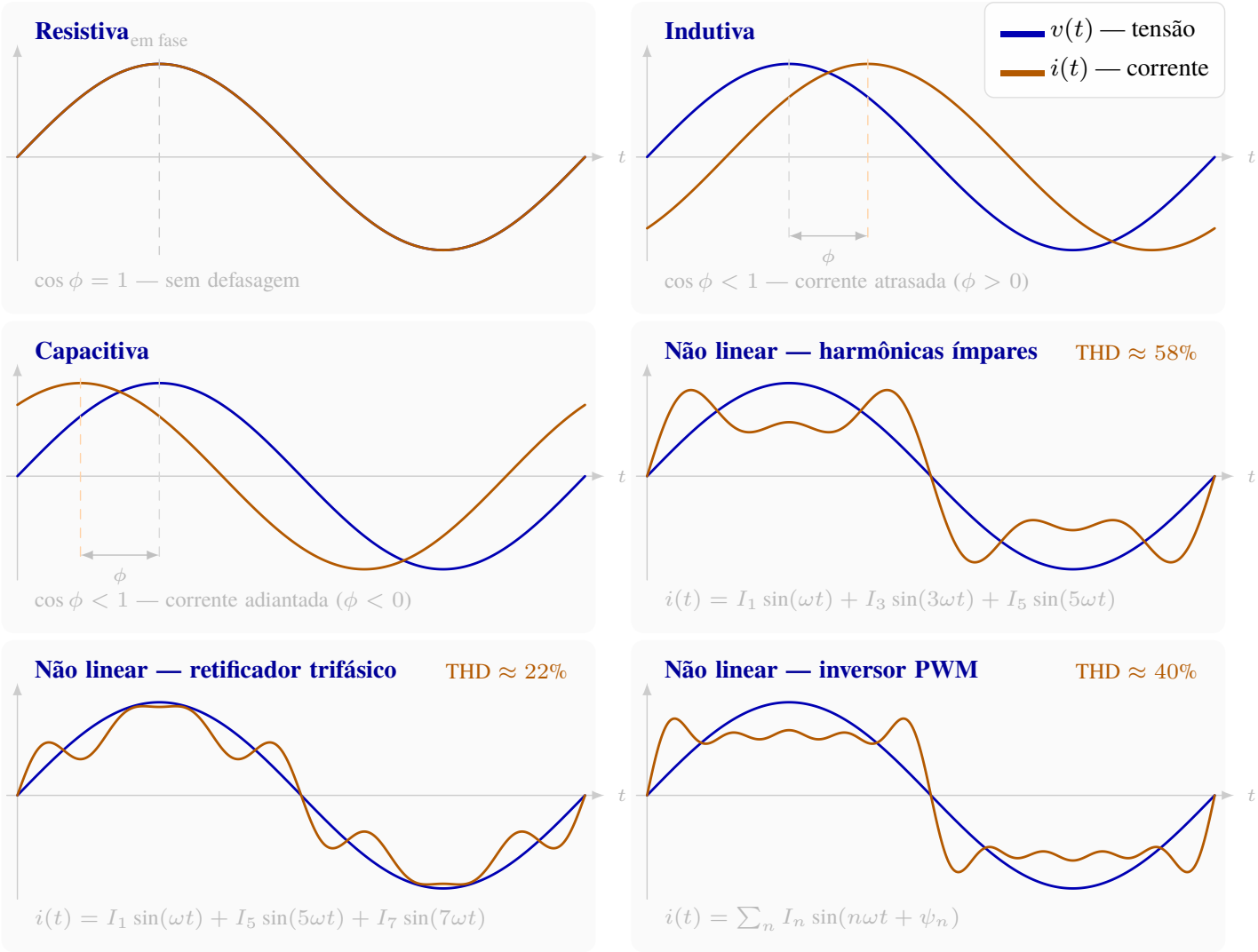

Figura 5.1: Formas de onda de diferença de potencial elétrico $v(t)$ (assumindo uma fonte de tensão senoidal como termo forçante do circuito) e corrente elétrica $i(t)$ — não necessáriamente senoidal, como consequência da relação $i(t) = \mathcal{F}\big(v(t), Z\big)$ com $|Z| = 1$ — em cargas lineares e não lineares. Nas cargas resistiva, indutiva e capacitiva, a corrente permanece senoidal, variando apenas sua defasagem em relação à diferença de potencial elétrico. Nas cargas não lineares, a corrente é deformada pela presença de componentes harmônicas, indicadas qualitativamente pela distorção harmônica total (*Total Harmonic Distortion*, THD).

! Importante

Impacto no dimensionamento: Cargas indutivas aumentam a corrente necessária para uma mesma potência ativa devido ao fator de potência reduzido. Esse aumento de corrente pode exigir condutores de maior seção, dispositivos de proteção com características adequadas e verificação mais rigorosa da queda de tensão e das perdas por efeito Joule.
Cargas capacitivas podem ser utilizadas para compensação de potência reativa, especialmente em instalações com predominância de motores e transformadores. Entretanto, devem ser especificadas com cuidado, pois a sobrecompensação pode produzir fator de potência capacitivo, elevação de diferença de potencial elétrico, ressonâncias com a rede e atuação inadequada de dispositivos de manobra ou proteção.
Cargas não lineares, além de aumentarem perdas, podem exigir análise adicional devido à presença de harmônicas. Essas componentes podem provocar aquecimento extra em transformadores, condutores e barramentos, circulação elevada de corrente no neutro, interferências eletromagnéticas e funcionamento inadequado de dispositivos de proteção.

Saiba Mais

Modelamento de cargas não lineares: Em uma carga linear ideal, a relação entre diferença de potencial elétrico e corrente pode ser descrita por uma impedância constante, de modo que uma forma de onda senoidal de $v(t)$ produz uma corrente também senoidal, ainda que defasada. Em uma carga não linear, essa proporcionalidade deixa de ser válida: a corrente passa a depender de uma relação não linear com a diferença de potencial elétrico, podendo ser representada genericamente por $i(t) = \mathcal{F}\big(v(t), Z\big)$, em vez de apenas $i(t) = v(t)/Z$.
Matematicamente, quando a corrente permanece periódica, mas deformada, ela pode ser decomposta em uma componente fundamental e em componentes harmônicas por meio de uma série de Fourier:

$$i(t) = I_1 \cdot \sin(\omega t + \psi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} \big(I_n \cdot \sin(n\omega t + \psi_n)\big)$$

onde I_1 representa a amplitude da componente fundamental, I_n representa a amplitude da harmônica de ordem n e ψ_n representa o ângulo de fase associado a cada componente. Esse tipo de modelamento é útil para avaliar distorção harmônica, aquecimento adicional, perdas, circulação de correntes no neutro e possíveis efeitos sobre transformadores, condutores e dispositivos de proteção.

Em instalações industriais reais diferentes tipos de carga estão presentes simultaneamente. Um mesmo quadro pode alimentar motores, tomadas, iluminação, inversores de frequência e varios outros sistemas. Por isso, a classificação das cargas é uma ferramenta de análise para orientar o projetista na escolha dos critérios de cálculo.

5.2.2 Motor de indução trifásico

O motor de indução trifásico é amplamente utilizado na indústria devido à sua robustez, simplicidade construtiva, baixo custo relativo e facilidade de manutenção (Chapman, 2012). Seu funcionamento baseia-se na interação entre o campo magnético girante produzido no estator e as correntes induzidas no rotor.

Quando os enrolamentos do estator são alimentados por um sistema trifásico, é produzido um campo magnético girante. Esse campo atravessa o entreferro e induz correntes no rotor. A interação entre o campo magnético do estator e as correntes induzidas no rotor produz torque eletromagnético, responsável pela rotação.

A velocidade angular síncrona do campo girante pode ser expressa em rotações por minuto, em vez de $[\mathrm{rad/s}]$. Em aplicações industriais e placas de motores, utiliza-se frequentemente a seguinte relação:

$$n_s = 120 \cdot f \cdot p^{-1}, \tag{5.1}$$

onde:

- n_s é a velocidade síncrona, em rotações por minuto [rpm];
- f é a frequência da rede, em hertz [Hz];
- p é o número de polos do motor.

Nota

Polos do motor: O símbolo p indica o **número total de polos magnéticos** formados no motor (sempre número par), e não o número de pares de polos. Esses polos surgem da configuração construtiva do estator, isto é, da maneira como os devanados, bobinas e espiras são distribuídos espacialmente ao redor do motor trifásico.
Fisicamente, os polos magnéticos sempre se organizam em pares norte–sul. Assim, um motor de 2 polos possui 1 par de polos; um motor de 4 polos possui 2 pares de polos; um motor de 6 polos possui 3 pares de polos; e assim sucessivamente. Quanto maior for o número de polos resultante dessa distribuição dos enrolamentos, mais lentamente o campo magnético girante se deslocará em torno do estator para uma mesma frequência de alimentação.

A velocidade síncrona não é, em geral, a velocidade angular real do rotor. Em um motor de indução, o rotor gira ligeiramente abaixo da velocidade síncrona para que exista movimento relativo entre o campo girante e os condutores do rotor. Esse movimento relativo é necessário para que haja indução de corrente no rotor e produção de torque. Essa condição pode ser compreendida matematicamente a partir do escorregamento. Define-se:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}, \tag{5.2}$$

onde n representa a velocidade angular do rotor, isto é, a rotação disponível no eixo do motor. A frequência das correntes induzidas no rotor, f_r, é proporcional à frequência elétrica f pelo fator de escorregamento s, ou seja: $f_r = s \cdot f$. Assim, se o rotor atingisse exatamente a velocidade síncrona, ter-se-ia $n = n_s$, logo $s = 0$ e, portanto, $f_r = 0$. Nessa condição ideal, não haveria variação de fluxo magnético relativo nos condutores do rotor, a força eletromotriz induzida tenderia a zero e o torque eletromagnético não poderia ser mantido. Por isso, o motor de indução necessita de escorregamento, ou seja, $s \geq 0$ e $f_r \neq 0$, para produzir torque em regime de carga.

Sem escorregamento, não há variação de fluxo magnético relativo e, portanto, não há corrente induzida. Consequentemente, o torque eletromagnético é nulo e o motor não consegue sustentar carga mecânica. Por essa razão, o motor de indução opera sempre com pequena diferença entre as velocidades angulares síncrona e do rotor.

À medida que a carga mecânica aumenta:

- o rotor tende a desacelerar, isto é, n diminui, permitindo aumento no escorregamento;
- a corrente induzida no rotor aumenta e, consequentemente, a corrente absorvida da rede também aumenta;
- o torque eletromagnético cresce para equilibrar a carga mecânica.

A Figura 5.2 apresenta qualitativamente a relação entre torque e escorregamento em um motor de indução. Essa curva é importante para compreender a região usual de operação e o limite de estabilidade do motor.

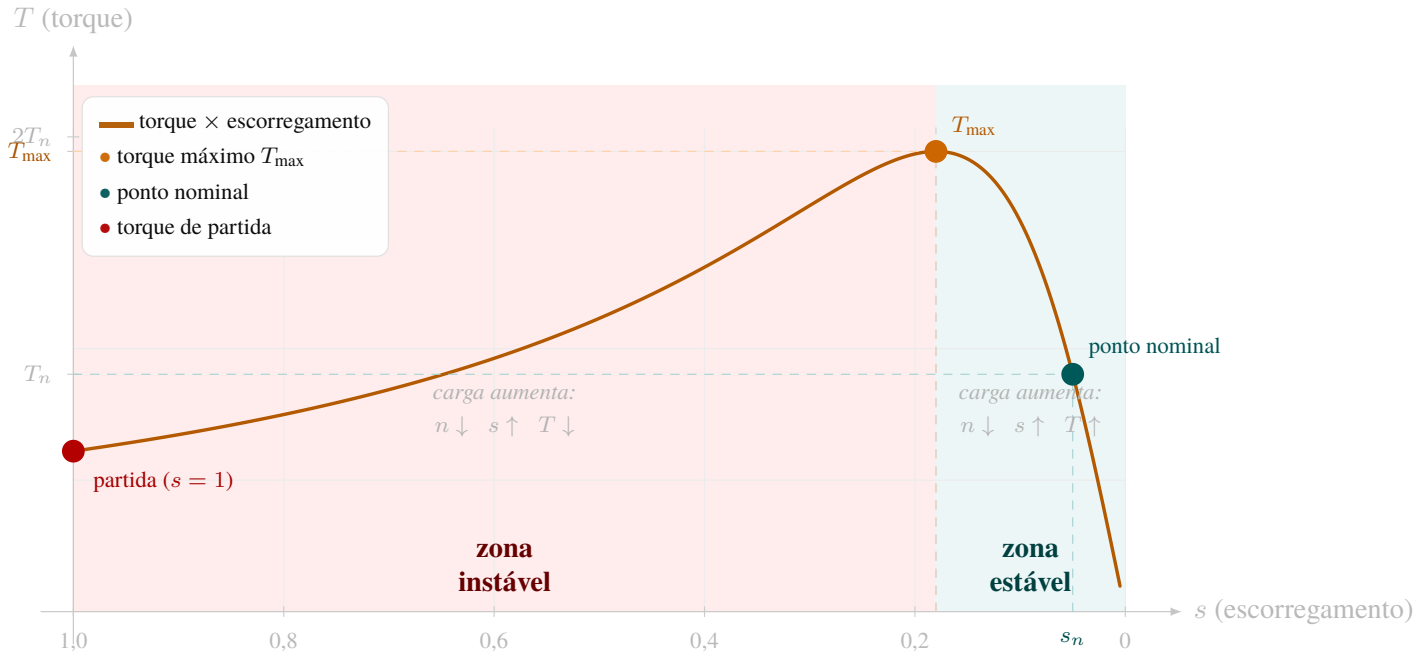

Figura 5.2: Curva característica torque-escorregamento do motor de indução trifásico, com indicação qualitativa da região usual de operação, do torque máximo e da perda de estabilidade em sobrecarga.

Saiba Mais

Motor de indução como sistema eletromecânico: Do ponto de vista da teoria de controle, o motor de indução pode ser interpretado como um sistema eletromecânico com realimentação natural entre carga mecânica, velocidade, escorregamento, corrente e torque. Em uma região normal de operação, uma pequena redução de velocidade aumenta o escorregamento, elevando o torque eletromagnético e tendendo a restaurar o equilíbrio com a carga.
Entretanto, se a carga mecânica exigir torque superior ao torque máximo disponível, o motor pode perder estabilidade. Nessa condição, a redução de velocidade aumenta o escorregamento, mas o torque eletromagnético não cresce o suficiente para recuperar o regime. O motor tende então a desacelerar rapidamente, podendo entrar em uma condição próxima ao travamento do rotor, com corrente elevada, aquecimento excessivo e risco de atuação da proteção.

Importante

Comportamento do motor: O motor de indução ajusta automaticamente sua corrente conforme a carga mecânica aplicada. Quanto maior a carga no eixo, maior tende a ser o escorregamento e maior será a corrente solicitada da rede, dentro dos limites nominais do equipamento. Fora da região estável de operação, entretanto, o aumento de escorregamento pode não ser suficiente para sustentar a carga, resultando em desaceleração e sobrecorrente.

Esse comportamento explica por que um motor não deve ser analisado apenas pela potência nominal. A corrente elétrica depende da carga mecânica, do rendimento, do fator de potência, da diferença de potencial elétrico de alimentação e das condições de partida.

5.2.3 Interpretação da placa de identificação

A placa de identificação fornece os dados necessários para o dimensionamento elétrico do circuito de alimentação do motor. Ela deve ser consultada antes da seleção de condutores, dispositivos de proteção, contatores, relés térmicos e métodos de partida.

Entre os dados mais relevantes, destacam-se:

- Potência nominal (P_n): potência mecânica disponível no eixo, geralmente expressa em [cv], [hp] ou [kW];
- Diferença de potencial elétrico nominal (V): valor de alimentação previsto para operação, em volt [V];
- Corrente nominal (I_n): corrente em regime permanente, em ampere [A];
- Rendimento (η): relação entre potência mecânica útil e potência elétrica de entrada;
- Fator de potência ($\cos\phi$): relação entre potência ativa e potência aparente;
- Frequência (f): frequência de alimentação, normalmente 50 [Hz] ou 60 [Hz];
- Rotação nominal (n): velocidade mecânica do rotor em regime estável, em [rpm];

Saiba Mais

Aplicação prática: A leitura da placa de identificação permite verificar se o motor é compatível com a rede disponível e com o método de ligação previsto. Em fabricantes diferentes, como WEG, Siemens, ABB ou outros fornecedores industriais, a organização visual da placa pode variar, mas as grandezas fundamentais tendem a se repetir: potência, diferença de potencial elétrico, corrente, frequência, rotação, rendimento, fator de potência e grau de proteção.
Também podem existir subtipos de motores de indução, como motores de alto rendimento, motores para variador de frequência, motores com freio, motores para atmosferas explosivas, motores com proteção aumentada e motores de carcaça especial. Em todos os casos, os dados de placa devem ser usados como referência primária para verificar compatibilidade elétrica, regime de operação, método de partida e limites de aplicação.

Importante

Potência nominal do motor: A potência nominal indicada na placa de um motor geralmente corresponde à potência mecânica útil disponível no eixo, e não diretamente à potência elétrica absorvida da rede. Por isso, para estimar a potência elétrica de entrada, deve-se considerar o rendimento do motor.
Essa distinção é essencial no projeto elétrico: o circuito alimentador deve ser dimensionado a partir da potência elétrica exigida da rede, enquanto a potência nominal do motor informa a capacidade mecânica entregue à carga.

5.2.4 Derivação da corrente elétrica do motor

A potência elétrica de entrada do motor é obtida a partir da potência mecânica nominal e do rendimento:

$$P_{eletr} = \frac{P_n}{\eta}, \tag{5.3}$$

onde:

- P_{eletr} é a potência elétrica de entrada, em watt [W];
- P_n é a potência mecânica nominal no eixo, em watt [W];
- η é o rendimento do motor.

Para um motor trifásico, a potência elétrica de entrada também pode ser escrita como:

$$P_{eletr} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_n \cdot \cos\phi. \tag{5.4}$$

Isolando-se a corrente nominal, obtém-se:

$$I_n = \frac{P_{eletr}}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\phi}. \tag{5.5}$$

Substituindo a expressão de P_{eletr}, também se pode escrever:

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \eta \cdot \cos\phi}. \tag{5.6}$$

Essa equação demonstra que a corrente do motor aumenta quando o rendimento e o fator de potência diminuem, e que para a mesma potência o aumento da diferença de potencial elétrico de linha reduz a corrente solicitada.

5.2.5 Potência aparente do motor

Em sistemas trifásicos, a potência aparente associada ao motor é dada por:

$$S = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L = \frac{P_{eletr}}{\cos\phi}, \tag{5.7}$$

onde:

- S é a potência aparente, em volt-ampere [VA];
- P_{eletr} é a potência ativa elétrica de entrada, em watt [W];
- $\cos\phi$ é o fator de potência.

Essa relação evidencia que a potência aparente está diretamente associada à corrente solicitada da rede. Assim, mesmo quando a potência mecânica útil permanece constante, um baixo fator de potência pode elevar a potência aparente e, consequentemente, aumentar a corrente nos alimentadores.

Importante

Impacto no projeto: A potência aparente determina a corrente solicitada da rede e influencia diretamente o dimensionamento de cabos, transformadores, disjuntores, contatores e demais componentes do circuito. Motores com baixo fator de potência podem exigir maior capacidade elétrica mesmo quando a potência mecânica útil permanece a mesma.

A análise da potência aparente é relevante em instalações com grande quantidade de motores, pois esse conjunto influencia diretamente a demanda sobre transformadores, alimentadores e sistemas de distribuição interna.

Saiba Mais

Corrente e potência em outros tipos de motores: As relações apresentadas para motores trifásicos são especialmente úteis para motores de indução, mas a lógica geral do cálculo pode ser estendida a outros tipos de motores. Em todos os casos, parte-se da potência mecânica útil requerida no eixo, considera-se o rendimento do motor e determina-se a potência elétrica solicitada. A diferença principal está no modo como a corrente é obtida, pois ela depende do tipo de alimentação, do fator de potência, do acionamento eletrônico e do regime de operação. De forma geral, a potência mecânica no eixo pode ser relacionada ao torque e à velocidade angular por: $P_{\text{mec}} = \mathcal{T} \cdot \omega_m$, onde $\mathcal{T}$ é o torque no eixo, em newton-metro $[\text{N m}]$, e ω_m é a velocidade angular mecânica, em radiano por segundo $[\text{rad/s}]$. Quando a potência mecânica útil é conhecida, a potência elétrica de entrada pode ser estimada pela Equação 5.3, sendo η o rendimento do motor ou, quando houver conversor/controlador eletrônico, o rendimento global do conjunto motor–acionamento.

Em **motores síncronos com rotor excitado**, quando a alimentação é trifásica senoidal, a potência elétrica de entrada pode ser calculada usando a Equação 5.4. A diferença em relação ao motor de indução está no fato de que o fator de potência pode ser atrasado, aproximadamente unitário ou adiantado, conforme a excitação do rotor. Assim, a corrente solicitada da rede depende também da condição de excitação da máquina.

Em **motores síncronos de ímãs permanentes** e em **motores síncronos de relutância**, a rotação acompanha a velocidade síncrona imposta pela frequência elétrica de alimentação. Na prática industrial, esses motores são frequentemente alimentados por variadores de frequência. Nesse caso, o projetista deve distinguir a corrente no lado da rede, usada para dimensionar alimentadores e proteção, da corrente no lado do motor, que depende da estratégia de controle, da frequência aplicada, do torque exigido e dos dados fornecidos pelo fabricante.

Em **motores sem escovas** (*BLDC*), a comutação é realizada eletronicamente, e não por escovas mecânicas. Embora o motor possua fases no estator, a corrente pode apresentar forma trapezoidal, pulsada ou controlada por modulação eletrônica, conforme o acionamento utilizado. Por isso, a corrente nominal do motor, a corrente máxima do controlador, a corrente do barramento de corrente contínua e a corrente absorvida da rede não devem ser confundidas.

Em **servomotores**, o motor atua como elemento eletromecânico de um sistema de controle composto por acionamento eletrônico, sensor de posição ou velocidade e malha de realimentação, sendo comum o uso de motores de corrente contínua ou de máquinas sem escovas comandadas eletronicamente. Nesses casos, a estimativa básica da potência elétrica pode partir da Equação 2.6, ajustada pelo rendimento quando se deseja relacionar a potência elétrica de entrada à potência mecânica no eixo; entretanto, a corrente não depende apenas da potência nominal, mas também do torque instantâneo solicitado, da aceleração, da frenagem, da velocidade e do ciclo de trabalho. Em motores CC com excitação separada, derivação, série ou composta, pode haver distinção entre corrente de armadura e corrente de campo. Assim, o dimensionamento deve considerar o circuito efetivamente alimentado, o método de controle de velocidade, a corrente contínua admissível, a corrente de pico, o tempo máximo de sobrecarga e o regime de operação indicado pelo fabricante.

Em **motores de passo** (*steppers*), a corrente não é determinada apenas pela potência mecânica de saída. O controlador energiza as fases em sequência e, muitas vezes, mantém corrente mesmo com o eixo parado, para produzir torque de retenção. Por isso, a corrente por fase, a diferença de potencial elétrico do acionamento, o modo de passo, o ciclo de operação e o aquecimento dos enrolamentos são dados mais relevantes para calcular o consumo.

Em **motores de relutância chaveada**, **motores lineares**, **motores de torque** e outros atuadores especiais, a corrente depende fortemente do acionamento eletrônico e da forma como o torque é produzido. Nesses casos, as correntes podem ser pulsadas, assimétricas ou controladas por malha fechada, tornando inadequado aplicar diretamente as expressões senoidais trifásicas sem verificar a topologia do conversor e os dados de catálogo.

5.2.6 Corrente de partida

Durante a partida, assumindo que não se utiliza nenhum dispositivo de acionamento que modifique a corrente inicial, o motor de indução pode apresentar corrente significativamente superior à corrente nominal. Em uma partida direta, a corrente de partida pode ser estimada, de forma simplificada, por:

$$I_{partida} = k \cdot I_n, \tag{5.8}$$

onde $k \approx 5$ a 8. O coeficiente k depende do fluxo magnético, da reatância do rotore do escorregamento inicial.

O valor de $I_{partida}$ depende da construção do motor, da potência, da impedância da rede, do tipo de carga mecânica acoplada e do método de partida utilizado. Motores acionados por partida direta tendem a apresentar correntes mais elevadas que motores acionados por *soft-starter* (variador de tensão) ou por *variador de frequência*.

O *soft-starter* é um dispositivo de partida suave, isto é, um equipamento eletrônico utilizado para aplicar gradualmente a diferença de potencial elétrico ao motor durante a partida. Em vez de aplicar instantaneamente a diferença de potencial elétrico nominal aos terminais do motor, o *soft-starter* controla o ângulo de disparo de dispositivos semicondutores, como tiristores, elevando progressivamente a diferença de potencial elétrico aplicada. Com isso, reduzem-se a corrente de partida, o impacto mecânico no eixo, os golpes de torque e a queda de tensão na rede.

O variador de frequência é um equipamento eletrônico de potência capaz de controlar a frequência e a amplitude da diferença de potencial elétrico aplicada ao motor. Como a velocidade síncrona do campo girante depende da frequência, o variador permite regular a velocidade do motor de forma controlada. Durante a partida, ele pode iniciar o motor com baixa frequência e baixa diferença de potencial elétrico, elevando ambas gradualmente. Isso reduz a corrente de partida e permite controle de aceleração, frenagem, velocidade e torque.

Desambiguação

Variador de frequência: O termo tecnicamente mais adequado para o equipamento que controla a velocidade de motores por alteração da frequência elétrica de alimentação é *variador de frequência*. A expressão *inversor de frequência*, embora muito difundida comercialmente, é menos precisa do ponto de vista físico, pois a frequência não é "invertida"; ela é ajustada, controlada ou sintetizada em outro valor. O termo *inversor* refere-se mais especificamente ao estágio eletrônico que converte corrente contínua em corrente alternada, dentro do conjunto do equipamento.

Em circuitos de motores, portanto, deve-se distinguir entre diferentes correntes utilizadas no projeto:

- **Corrente nominal (I_n):** corrente indicada na placa do motor para operação em regime nominal, com carga, frequência e diferença de potencial elétrico especificadas pelo fabricante.
- **Corrente de projeto (I_B):** corrente adotada como referência para o dimensionamento do circuito alimentador, considerando a carga a ser atendida e as condições normais de operação.
- **Corrente de partida ($I_{partida}$):** corrente transitória solicitada durante a aceleração inicial do motor, geralmente superior à corrente nominal, especialmente em partida direta.
- **Corrente de curto-circuito (I_{cc}):** corrente de falta de elevada intensidade, limitada principalmente pela impedância da rede e do percurso de falta, utilizada para seleção da capacidade de interrupção e coordenação dos dispositivos de proteção. O cálculo dessa corrente depende das configurações específicas do circuito.

Aviso

Corrente transitória: A corrente de partida não deve ser usada diretamente como corrente de regime, isto é, corrente em estado estável do circuito ou sistema, para dimensionar cabos em operação contínua. Entretanto, ela deve ser considerada na escolha de dispositivos de proteção, contatores, relés e métodos de partida. Caso contrário, podem ocorrer desligamentos indevidos, queda de tensão excessiva ou esforços mecânicos elevados na partida.

Cada uma dessas correntes é empregada em uma etapa diferente do dimensionamento. A corrente nominal auxilia na leitura da placa e na verificação de operação do motor; a corrente de projeto orienta o dimensionamento dos condutores; a corrente de partida influencia a escolha do método de partida e da curva de atuação da proteção; e a corrente de curto-circuito é essencial para verificar a capacidade de interrupção dos dispositivos.

Saiba Mais

Corrente de curto-circuito: A corrente de curto-circuito é a corrente que circula quando ocorre uma falta elétrica, isto é, uma ligação acidental ou indesejada entre pontos de potenciais diferentes, como entre fases, entre fase e neutro ou entre fase e terra. Em projetos elétricos industriais, essa corrente é uma das grandezas mais importantes para a seleção de disjuntores, fusíveis, contatores, barramentos, quadros, condutores e demais componentes sujeitos a esforços térmicos e eletrodinâmicos durante uma falta.
De forma simplificada, a rede elétrica vista a partir do ponto da falta pode ser substituída por uma fonte equivalente de Thévenin e por uma impedância equivalente:

$$Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq},$$

onde R_{eq} representa a parte resistiva equivalente do percurso da falta e X_{eq} representa a parte reativa, associada principalmente às indutâncias de transformadores, cabos, barramentos, motores e demais elementos da rede. Quanto menor for $|Z_{eq}|$, maior será a corrente de curto-circuito disponível no ponto analisado.
Para um curto-circuito trifásico simétrico, a corrente eficaz inicial pode ser estimada por:

$$I_{cc} = \frac{V_L}{\sqrt{3} \cdot |Z_{eq}|},$$

onde V_L é a diferença de potencial elétrico de linha no ponto de curto-circuito e $|Z_{eq}|$ é o módulo da impedância equivalente entre a fonte e o ponto da falta. Essa expressão é uma aproximação útil para compreender o fenômeno, mas análises completas podem exigir a consideração do tipo de falta, da impedância dos transformadores, da contribuição de motores, do comprimento dos cabos, do aterramento e das características da concessionária.
Além do valor eficaz simétrico, a corrente de curto-circuito apresenta comportamento transitório. No instante inicial da falta, a forma de onda pode ser assimétrica, pois a componente alternada senoidal pode se somar a uma componente contínua decrescente. De modo simplificado:

$$i_{cc}(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \alpha) + I_{dc,0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

onde I_m é a amplitude da componente alternada, ω é a frequência angular da rede, α depende do instante em que a falta ocorre, $I_{dc,0}$ é a componente contínua inicial e τ é a constante de tempo do circuito, aproximadamente dada por:

$$\tau = \frac{L_{eq}}{R_{eq}}.$$

Essa componente contínua é responsável pela assimetria inicial da corrente de curto-circuito. Quanto maior for a relação X/R da rede, mais lenta será a redução dessa componente contínua e maior poderá ser o pico inicial da corrente. Por isso, dois pontos de uma mesma instalação podem apresentar correntes de curto-circuito muito diferentes: próximo ao transformador, a impedância equivalente tende a ser menor e a corrente de falta maior; em pontos mais distantes, a impedância dos cabos reduz a corrente disponível.
Em instalações industriais com motores, também pode ocorrer contribuição transitória das máquinas para a corrente de curto-circuito. Durante os primeiros instantes da falta, motores em rotação podem se comportar como fontes temporárias, fornecendo corrente ao defeito devido à energia armazenada nos campos magnéticos e na inércia mecânica do conjunto. Essa contribuição é especialmente relevante em instalações com grande quantidade de motores ou com motores de potência elevada.
No dimensionamento, não se avalia apenas a corrente eficaz permanente de curto-circuito. Também devem ser considerados a corrente de pico, que produz esforços eletrodinâmicos nos barramentos e condutores; a corrente suportável de curta duração, associada ao aquecimento durante o tempo de eliminação da falta; e a energia térmica passante, frequentemente relacionada ao termo $I^2 \cdot t$. Assim, os dispositivos de proteção devem possuir capacidade de interrupção compatível com a corrente de curto-circuito disponível no ponto de instalação e devem atuar de forma coordenada para limitar danos aos equipamentos e riscos às pessoas.

Exemplo

Cálculo detalhado de corrente: Considere um motor trifásico de $5\,[\text{cv}]$, alimentado em $220\,[\text{V}]$, com rendimento $\eta = 0{,}85$ e fator de potência $\cos\phi = 0{,}80$.
Passo 1 — Conversão de potência:

$$P_n = 5\,[\text{cv}] \cdot 736\left[\frac{\text{W}}{\text{cv}}\right] = 3680\,[\text{W}].$$

Passo 2 — Potência elétrica de entrada:

$$P_{eletr} = \frac{3680}{0{,}85} \approx 4329\,[\text{W}].$$

Passo 3 — Corrente nominal:

$$I_n = \frac{4329}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0{,}80} \approx 14{,}2\,[\text{A}].$$

Cada parâmetro influencia diretamente o resultado. O rendimento η indica que a potência elétrica de entrada deve ser maior que a potência mecânica útil. O fator de potência $\cos\phi$ afeta a corrente solicitada da rede. A diferença de potencial elétrico de linha V_L reduz a corrente quanto maior for seu valor, para a mesma potência.
Se a corrente de partida for estimada entre 5 e 8 vezes a corrente nominal, tem-se:

$$I_{partida,\text{min}} \approx 5 \cdot 14{,}2 = 71\,[\text{A}], \qquad I_{partida,\text{max}} \approx 8 \cdot 14{,}2 = 113{,}6\,[\text{A}].$$

Essa faixa deve ser considerada na seleção dos dispositivos de comando e proteção, evitando atuações indevidas durante a partida. Em uma partida direta, a proteção deve permitir a passagem temporária dessa corrente sem desligamento indevido, mas ainda deve atuar corretamente em caso de sobrecarga persistente ou curto-circuito.

5.3 Resumo do capítulo

Neste capítulo, analisou-se a caracterização de cargas elétricas industriais e motores para o dimensionamento de circuitos, proteções e métodos de partida. Demonstrou-se que a avaliação de uma carga exige considerar, além da potência nominal, parâmetros como tensão, número de fases, fator de potência, rendimento, corrente de partida, regime de operação e distorção harmônica total (THD). As cargas foram classificadas conforme sua natureza físico-elétrica, avaliando-se o impacto do baixo fator de potência das cargas indutivas, os riscos de sobrecompensação e ressonância das capacitivas, e os efeitos térmicos e perdas gerados pelas harmônicas das cargas não lineares.

Em seguida, o estudo focou no motor de indução trifásico, abordando o campo magnético girante, o escorregamento e a produção de torque. Esse sistema eletromecânico foi analisado sob a interação entre carga, velocidade, corrente e conjugado, destacando-se o risco de travamento do rotor por perda de estabilidade. Também se revisou a placa de identificação, ressaltando que a potência nominal corresponde à mecânica útil no eixo, exigindo a aplicação do rendimento para obter a potência elétrica absorvida.

A partir disso, desenvolveram-se as relações matemáticas para o cálculo de correntes em motores de indução e estendeu-se essa lógica a outras tecnologias, como motores síncronos, de corrente contínua e de passo, cuja determinação da corrente depende do acionamento eletrônico e do controle aplicado. Por fim, diferenciaram-se as correntes nominal, de projeto, de partida e de curto-circuito. A corrente de partida foi relacionada aos métodos de acionamento (partida direta, *soft-starter* e inversores), enquanto a de curto-circuito foi apresentada sob a ótica do equivalente de Thévenin, assimetria e efeitos térmicos, essencial para a capacidade de interrupção das proteções.

Conclui-se que a correta caracterização das cargas industriais e a interpretação dos dados de catálogo são fundamentais para quantificar correntes, prever transitórios, mitigar efeitos harmônicos e selecionar dispositivos de proteção, garantindo a segurança, a eficiência e a conformidade técnica do projeto elétrico industrial.

Capítulo 6

Proteção e aterramento

6.1 Introdução

A segurança das instalações elétricas industriais depende da correta aplicação dos **sistemas de proteção** e dos **sistemas de aterramento**. Esses elementos atuam de forma complementar: enquanto os dispositivos de proteção identificam e interrompem o circuito em condições anormais, como sobrecargas e curtos-circuitos, o sistema de aterramento fornece caminho adequado para correntes de falta e contribui para manter potenciais seguros nas partes metálicas acessíveis, reduzindo riscos de choque elétrico e danos aos equipamentos.

Em um ambiente industrial, onde há elevada concentração de equipamentos, motores, painéis e grande circulação de energia elétrica, falhas podem resultar não apenas em danos materiais, mas também em riscos graves à integridade física das pessoas. Dessa forma, o projeto elétrico deve prever mecanismos que atuem de forma rápida, seletiva e confiável, conforme os critérios aplicáveis às instalações elétricas de baixa tensão (ABNT NBR 5410, 2004).

! Importante

Segurança elétrica: A proteção elétrica não tem como objetivo apenas preservar equipamentos, mas principalmente garantir a segurança das pessoas contra choques elétricos, queimaduras, arcos elétricos e incêndios de origem elétrica.

O objetivo deste capítulo é apresentar os principais dispositivos de proteção utilizados em instalações de baixa tensão, tanto prediais quanto industriais, bem como os fundamentos dos sistemas de aterramento, conforme as recomendações da **ABNT NBR 5410**. Não serão abordadas normas de aplicação específica, como **ABNT NBR 7117**, **ABNT NBR 15749** ou **ABNT NBR 15751**. Busca-se estabelecer a relação entre corrente de falta, atuação dos dispositivos de proteção, equipotencialização e esquemas de aterramento.

6.2 Fundamentos da proteção elétrica

A proteção elétrica baseia-se na identificação de situações anormais de operação e na atuação coordenada de dispositivos capazes de interromper o circuito antes que ocorram danos aos condutores, equipamentos ou pessoas. Assim, aplicar um conjunto de técnicas analíticas e práticas de "proteção" sobre um circuito implica limitar os efeitos térmicos, eletrodinâmicos e fisiológicos das correntes anormais.

Os **efeitos térmicos** estão associados ao aquecimento produzido pela passagem da corrente elétrica através da matéria. Em materiais ôhmicos, esse aquecimento é regido pelo efeito Joule, sendo proporcional a $i^2(t)$. Dessa forma, correntes acima do valor admissível podem degradar a isolação dos cabos, reduzir a vida útil dos componentes, provocar deformações em barramentos, carbonização de materiais isolantes e, em casos extremos, iniciar incêndios.

Os **efeitos eletrodinâmicos** estão associados às forças mecânicas produzidas por correntes elevadas, especialmente em curtos-circuitos. Quando correntes intensas circulam por condutores próximos, surgem esforços de atração ou repulsão entre eles. Esses esforços podem deslocar barramentos, danificar conexões, abrir contatos, deformar suportes e comprometer a integridade mecânica de painéis elétricos. Por isso, além da capacidade térmica, equipamentos e barramentos devem suportar os esforços mecânicos associados à corrente de curto-circuito.

Os **efeitos fisiológicos** referem-se aos impactos da corrente elétrica no corpo humano. Mesmo correntes relativamente pequenas podem provocar contrações musculares, dificuldade de desprendimento, queimaduras, fibrilação ventricular ou parada respiratória, dependendo da intensidade, do tempo de exposição, do percurso da corrente pelo corpo e das condições de contato. Por esse motivo, a proteção contra choques elétricos deve combinar isolamento, aterramento, equipotencialização, seccionamento automático e, em muitos casos, dispositivos diferenciais-residuais.

As causas que permitem os efeitos citados anteriormente são classificadas em três tipos principais:

Definição

Sobrecarga: Situação em que a corrente elétrica ultrapassa o valor admissível do circuito durante um período prolongado, sem ocorrência de falha direta entre condutores. Normalmente está associada ao uso simultâneo excessivo de cargas, à ampliação indevida do circuito ou ao dimensionamento inadequado.

A sobrecarga está normalmente associada ao uso excessivo de equipamentos ou ao dimensionamento inadequado do circuito. Como seu efeito principal é térmico, a atuação da proteção pode ocorrer com certo atraso, de acordo com a **curva de proteção térmica**, desde que o condutor não ultrapasse sua temperatura limite de operação.

Definição

Curto-circuito: Condição de falha em que há ligação de baixa impedância, idealmente representada por $Z \to 0$, entre condutores com potenciais diferentes, resultando em correntes elevadas em curto intervalo de tempo. Em uma representação simplificada, quando a impedância do percurso de falta tende a zero, a corrente tende a valores muito elevados, limitados na prática pela potência máxima que a fonte pode fornecer.

O curto-circuito caracteriza-se por uma falha abrupta e de elevada intensidade. Diferentemente da sobrecarga, sua duração deve ser muito pequena, de acordo com a **curva de proteção magnética**, isto é, a região de atuação magnética ou instantânea do dispositivo de proteção, pois os esforços térmicos e eletrodinâmicos podem danificar condutores, barramentos, contatos, isolamentos e dispositivos de manobra.

Definição

Corrente de fuga à terra: A corrente de fuga à terra ocorre quando parte da corrente deixa o caminho previsto pelos condutores ativos e escoa por massas metálicas, carcaças, estruturas, umidade, solo ou pelo corpo humano. Note que, em todos os casos, é necessário um percurso condutivo, previsto ou não, conectado eletricamente a um ponto aterrado. As causas mais comuns incluem falha de isolamento, envelhecimento de cabos, umidade em caixas de passagem, danos mecânicos em condutores, contaminação por poeira condutiva, infiltração de água em motores, defeitos em resistências de aquecimento e degradação de componentes eletrônicos.
Podem ocorrer fugas permanentes, quando há defeito contínuo de isolamento; fugas intermitentes, quando o problema aparece apenas com vibração, umidade ou aquecimento; e fugas capacitivas, comuns em cabos longos, filtros eletrônicos e variadores de frequência. Mesmo quando a corrente de fuga é pequena, ela pode representar risco de choque elétrico, aquecimento localizado ou atuação indevida de dispositivos diferenciais-residuais.

A corrente de fuga à terra exige atenção especial, pois mesmo correntes relativamente pequenas podem representar risco grave às pessoas. Por esse motivo, sua análise deve considerar o esquema de aterramento, a continuidade do condutor de proteção, a equipotencialização e a sensibilidade dos dispositivos diferenciais-residuais.

Saiba Mais

Massa, terra e neutro: Em circuitos eletroeletrônicos, os termos *massa*, *terra* e *neutro* não devem ser tratados como sinônimos. A **massa** é, em geral, a referência elétrica interna de um circuito, frequentemente associada ao ponto de 0 [V] da placa eletrônica ou ao terminal comum de uma fonte; essa nomenclatura é usada frequentemente em eletrônica automotiva. O **terra** está relacionado ao sistema de aterramento da instalação, conectado fisicamente ao solo por meio de eletrodos e condutores de proteção, com a função de segurança elétrica, escoamento de correntes de falta e equipotencialização de partes metálicas acessíveis. Já o **neutro** é um condutor ativo do sistema de alimentação, normalmente associado ao ponto comum do secundário de um transformador ou de uma rede em estrela, utilizado como caminho de retorno da corrente em circuitos monofásicos.
Embora massa, terra e neutro possam estar interligados em pontos específicos de uma instalação, circuito ou equipamento, essa conexão deve seguir critérios técnicos e normativos específicos de cada aplicação. Ligar massa, terra e neutro de forma indiscriminada pode causar correntes indesejadas, ruídos elétricos, falhas de proteção, dessincronização, choques elétricos ou funcionamento inadequado de equipamentos sensíveis.

6.3 Disjuntores termomagnéticos

O disjuntor termomagnético é um dos dispositivos mais utilizados em instalações elétricas de baixa tensão. Sua principal função é interromper automaticamente o circuito quando a corrente ultrapassa valores seguros, protegendo condutores e equipamentos contra sobrecargas e curtos-circuitos.

Seu funcionamento baseia-se na atuação térmica e magnética, associadas ao aquecimento produzido por correntes acima do valor nominal e às correntes muito elevadas típicas de curto-circuito, respectivamente.

6.3.1 Proteção térmica

Quando a corrente aumenta, o aquecimento do condutor também aumenta; se o material é ôhmico, é possível explicar esse fenômeno pelo efeito Joule. O disjuntor utiliza um elemento bimetálico que se deforma com o aumento da temperatura, provocando a abertura do circuito quando a sobrecorrente permanece por tempo suficiente. Essa característica temporizada evita desligamentos desnecessários em pequenas variações transitórias de corrente, mas garante a abertura do circuito quando a condição de sobrecarga é persistente e pode causar aquecimento excessivo.

Nota

Atuação térmica: A atuação térmica é lenta e depende do tempo, sendo adequada para situações de sobrecarga, nas quais a corrente permanece acima do valor nominal do circuito. Quanto maior a corrente de sobrecarga, menor tende a ser o tempo necessário para o disparo.

6.3.2 Proteção magnética

A proteção magnética atua de forma praticamente instantânea. Quando ocorre um curto-circuito, a corrente elevada gera um campo magnético intenso, acionando um mecanismo interno que desarma o disjuntor rapidamente.

Nota

Atuação magnética: A atuação magnética é rápida e ocorre quando a corrente atinge valores muito elevados, típicos de curtos-circuitos. Nessa condição, o campo magnético produzido pela corrente aciona instantaneamente o mecanismo interno do disjuntor, interrompendo o circuito em um curto intervalo de tempo para limitar danos aos condutores, equipamentos e demais componentes da instalação.

Importante

Diferença fundamental: A **proteção térmica** atua com atraso, sendo adequada para sobrecargas. A **proteção magnética** atua quase instantaneamente, sendo adequada para curtos-circuitos.

A existência desses dois mecanismos em um mesmo dispositivo permite que o disjuntor termomagnético responda a diferentes tipos de sobrecorrente. A coordenação, no sentido de definir o tempo de atuação, entre esses mecanismos deve ser compatível com a carga alimentada e com a capacidade de condução dos condutores.

6.3.3 Critério de dimensionamento

Para garantir a segurança do sistema, deve-se obedecer à seguinte relação:

$$I_B \leq I_n \leq I_Z. \tag{6.1}$$

Essa nomenclatura é amplamente utilizada em textos normativos de instalações de baixa tensão, incluindo a **ABNT NBR 5410**. Por isso, seu conhecimento é importante para a leitura técnica de tabelas, critérios de dimensionamento e prescrições normativas. Entretanto, deve-se observar que os símbolos podem mudar em outros contextos, especialmente em análises matemáticas, modelos acadêmicos ou catálogos de fabricantes. O mais importante é interpretar corretamente o significado físico de cada grandeza, e não apenas memorizar a letra utilizada:

- I_B é a corrente de projeto, em ampere [A];
- I_n é a corrente nominal do disjuntor, em ampere [A];
- I_Z é a capacidade de condução de corrente do condutor, em ampere [A].

Essa relação indica que o disjuntor deve ter corrente nominal I_n maior ou igual à corrente de projeto I_B, evitando disparos em regime normal, e menor ou igual à capacidade do condutor I_Z, garantindo proteção contra sobrecarga.

Importante

Coordenação proteção-condutor: O disjuntor deve atuar antes que o condutor atinja sua temperatura limite de operação. Por isso, não se deve escolher um disjuntor apenas pela potência da carga; é necessário verificar a compatibilidade entre corrente de projeto, corrente nominal da proteção e capacidade de condução do cabo.

Saiba Mais

Corrente nominal do disjuntor termomagnético: A corrente nominal de um disjuntor termomagnético, normalmente indicada por I_n, representa a corrente que o dispositivo pode conduzir continuamente, em condições especificadas pelo fabricante, sem disparar indevidamente e sem ultrapassar seus limites térmicos internos. Esse valor não indica a corrente em que o disjuntor atua instantaneamente, mas sim a corrente de referência para sua operação permanente.
Do ponto de vista construtivo, essa corrente nominal está associada principalmente ao dimensionamento dos contatos, dos terminais, dos condutores internos e do elemento bimetálico responsável pela atuação térmica. O bimetal é calibrado para deformar-se quando o aquecimento produzido pela corrente ultrapassa determinados limites, permitindo a abertura do mecanismo em condições de sobrecarga. Assim, dois disjuntores com correntes nominais diferentes podem ter dimensões internas, calibração térmica e capacidade de dissipação de calor distintas.
Disjuntores termomagnéticos modernos também incorporam características construtivas que não eram comuns em dispositivos antigos, como câmaras de extinção de arco mais eficientes, mecanismos de disparo independentes da posição manual da alavanca, melhor isolamento interno, materiais com maior estabilidade térmica e marcações padronizadas de corrente nominal, diferença de potencial elétrico de operação e capacidade de interrupção. Por isso, a escolha de um disjuntor não deve considerar apenas o valor de I_n, mas também sua compatibilidade com o circuito, com a corrente de curto-circuito presumida e com as condições de instalação.

6.3.4 Curvas de disparo

Os disjuntores são classificados conforme suas curvas de atuação, que indicam a faixa de corrente na qual ocorre o disparo magnético instantâneo e o disparo térmico com retardo. Essa característica é importante porque diferentes cargas apresentam distintas correntes transitórias de energização.

A Figura 6.1 esquematiza as regiões térmica e magnética de atuação de um disjuntor termomagnético.

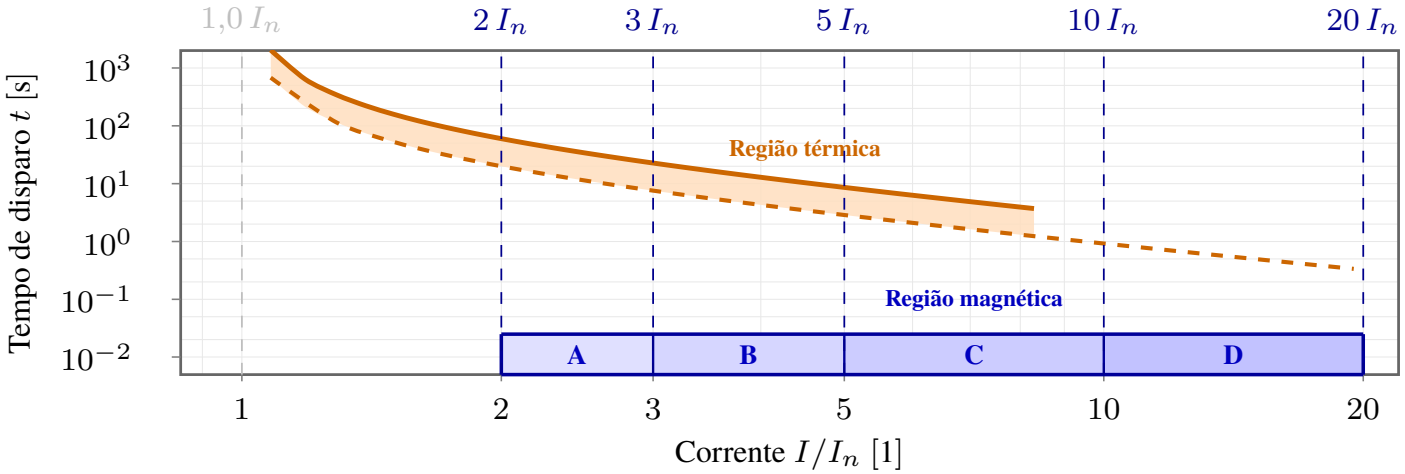

Figura 6.1: Curva esquemática, com escala ilustrativa, de disparo de um disjuntor termomagnético.

A Tabela 6.1 resume as curvas usuais de atuação magnética e suas aplicações típicas. A escolha da curva, para cada ramificação independente da instalação, deve ser feita com base na análise da carga, na corrente de partida, na corrente de magnetização, na corrente de curto-circuito presumida e na capacidade dos condutores.

Tabela 6.1: Curvas típicas de atuação magnética de disjuntores termomagnéticos

Curva	Atuação magnética	Aplicações usuais
A	2 a 3 vezes I_n	Circuitos sensíveis e equipamentos eletrônicos que exigem interrupção rápida de pequenas sobrecorrentes. Pouco usada em instalações industriais, pois pode causar desligamentos frequentes em circuitos fora do seu escopo.
B	3 a 5 vezes I_n	Circuitos com cargas predominantemente resistivas, baixa corrente de partida, iluminação comum e tomadas de uso geral sem cargas fortemente indutivas.
C	5 a 10 vezes I_n	Circuitos com equipamentos industriais gerais de menor porte, iluminação com reatores e equipamentos com corrente de energização moderada.
D	10 a 20 vezes I_n	Circuitos com motores de maior corrente de partida, transformadores, cargas com elevada corrente de magnetização e equipamentos que apresentam transitórios intensos na energização.

Circuitos com cargas predominantemente resistivas ou de baixa corrente de partida podem utilizar curvas mais sensíveis. Já circuitos com motores, transformadores ou cargas com corrente de magnetização elevada podem exigir curvas menos sensíveis ao transitório inicial, desde que a proteção contra curto-circuito permaneça adequada.

Aviso

Escolha da curva: Uma curva inadequada pode provocar desligamentos frequentes em condições normais de partida ou energização. Por outro lado, uma curva excessivamente permissiva pode comprometer a proteção contra faltas.

6.4 Dispositivo diferencial-residual

O dispositivo diferencial-residual tem como função principal proteger pessoas contra choques elétricos por contato indireto e, em determinadas aplicações, contribuir para a proteção contra incêndios provocados por correntes de fuga. Adicionalmente, pode ser empregado para identificar fugas de corrente decorrentes de problemas de isolamento. Na prática, a sigla DR pode aparecer associada a diferentes tipos de dispositivos:

- **IDR** — *interruptor diferencial-residual*, destinado a detectar correntes diferenciais e interromper o circuito, no sentido de operações de seccionamento, mas não substitui a proteção contra sobrecorrente.
- **DDR** — *disjuntor diferencial-residual*, combina, no mesmo equipamento, a função diferencial-residual e a proteção contra sobrecarga e curto-circuito. Em alguns catálogos, também podem aparecer denominações como módulo DR, relé DR ou dispositivo diferencial seletivo, dependendo da construção e da aplicação.
- **MDR** — *módulo diferencial-residual*, normalmente utilizado em associação com disjuntores compatíveis, permitindo adicionar a função diferencial a um conjunto de proteção já existente.
- **SDR** — *dispositivo diferencial-residual seletivo*, possui retardo intencional de atuação e é utilizado quando se deseja coordenação entre dispositivos diferenciais instalados em cascata, evitando que uma fuga localizada desligue toda a instalação.

A escolha do dispositivo depende da função desejada, como proteção de pessoas, proteção contra incêndio, seletividade, coordenação com disjuntores, corrente nominal do circuito, corrente diferencial-residual nominal, tipo de carga e forma de onda da corrente de fuga.

Além desses critérios gerais, em circuitos com equipamentos eletrônicos, variadores de frequência, fontes chaveadas ou componentes em corrente contínua pulsante, deve-se analisar o tipo de dispositivo diferencial-residual adequado, como tipo AC, tipo A, tipo F ou tipo B, conforme a natureza da corrente residual esperada.

Neste capítulo, para fins didáticos, será adotado o termo genérico “DR” para designar o dispositivo diferencial-residual responsável por detectar desequilíbrios de corrente entre condutores ativos e interromper o circuito quando a corrente diferencial ultrapassa o valor especificado.

Nota

Tipos de DR: Os dispositivos diferenciais-residuais podem ser classificados conforme o tipo de corrente residual que conseguem detectar, eles fuionan com o mesmo princípio mas são calibrados para diferentes faixas de operação.
O **tipo AC** atua apenas para correntes residuais alternadas senoidais, sendo adequado somente a cargas simples, sem eletrônica significativa.
O **tipo A** detecta correntes residuais alternadas senoidais e correntes residuais contínuas pulsantes, sendo mais apropriado para circuitos com equipamentos eletrônicos monofásicos, fontes retificadas, eletrodomésticos modernos e cargas com componentes semicondutores.
O **tipo F** amplia a atuação dos tipos A e AC, e é destinado a cargas com eletrônica de potência que podem produzir correntes residuais compostas, com componentes em diferentes frequências, como alguns acionamentos monofásicos, bifásicos, bombas, máquinas de lavar e equipamentos que usam motores com controle eletrônico de velocidade.
O **tipo B** possui a atuação mais abrangente, sendo capaz de detectar correntes residuais alternadas, contínuas pulsantes e contínuas lisas, além de componentes associadas a conversores eletrônicos mais complexos. Por isso, é utilizado em aplicações como variadores de frequência trifásicos, sistemas fotovoltaicos, carregadores de veículos elétricos, UPS e equipamentos industriais com retificação ou inversão eletrônica.
Também se encontra a designação **tipo S**, associada a DRs seletivos ou temporizados. Nesse caso, a letra não indica uma nova forma de onda detectada, mas uma característica de coordenação: o dispositivo atua com atraso intencional para permitir que um DR a jusante desligue primeiro o circuito defeituoso.
A escolha do tipo de DR deve considerar a carga alimentada (categoria, padrão de uso e tipo de instalação), a possibilidade de componentes contínuas ou harmônicas na corrente residual, a coordenação com outros dispositivos de proteção (incluindo os sistemas de aterramento) e as recomendações normativas e configurações do fabricante.

O funcionamento do DR baseia-se na comparação entre as correntes elétricas que circulam pelos condutores ativos do circuito protegido. Esses condutores atravessam um mesmo sensor diferencial, geralmente toroidal, de modo que o dispositivo avalia a soma algébrica das correntes que entram e saem da carga. Em condições normais de operação, pela conservação de carga e pela Lei dos Nós de Kirchhoff, toda corrente que segue para a carga retorna pelos condutores previstos. Assim, adotando uma mesma convenção de sinais, tem-se:

$$\sum_{k=1}^{m} i_k(t) = 0, \tag{6.2}$$

onde $i_k(t)$ representa a corrente instantânea no k-ésimo condutor ativo monitorado pelo DR.

A corrente diferencial residual pode ser definida como a soma algébrica das correntes monitoradas:

$$i_\Delta(t) = \sum_{k=1}^{m} i_k(t). \tag{6.3}$$

Em operação normal, espera-se que:

$$i_\Delta(t) = 0. \tag{6.4}$$

Caso ocorra fuga de corrente, por exemplo através de uma carcaça metálica, de uma superfície úmida, do condutor de proteção ou do corpo humano, parte da corrente deixa de retornar pelos condutores monitorados pelo DR. Nessa condição, surge uma corrente diferencial residual:

$$i_\Delta(t) \neq 0. \tag{6.5}$$

O disparo do DR ocorre quando o valor da corrente diferencial residual atinge ou supera a corrente diferencial-residual nominal de atuação do dispositivo, representada por $I_{\Delta n}$ (calculada com a Equação 4.1 sobre $i_\Delta(t)$):

$$I_{\Delta n} \leq I_\Delta, \tag{6.6}$$

onde I_Δ é o valor de referência da corrente diferencial residual eficaz utilizado para a atuação do dispositivo.

Definição

Corrente diferencial: Define-se corrente diferencial, $I_{\Delta n}$, como a diferença (RMS) entre a corrente que entra e a que sai de um circuito. Quando essa diferença ultrapassa o valor nominal de atuação do DR, o dispositivo é acionado.

Exemplo

Proteção adicional de pessoas: Para proteção adicional contra choques elétricos, utiliza-se frequentemente dispositivo DR com corrente diferencial-residual nominal de atuação não superior a I_Δ. Esse valor deve ser interpretado como corrente eficaz, isto é, como magnitude RMS da corrente diferencial residual:

$$I_{\Delta n} \leq 30\,[\text{mA}].$$

Assim, em um circuito destinado à proteção adicional de pessoas, um DR com $I_\Delta := 30\,[\text{mA}]$ é usualmente adotado. Esse valor, entretanto, não elimina a necessidade de aterramento, equipotencialização, isolamento adequado e proteção contra sobrecorrente. O DR atua como medida complementar de segurança, desligando o circuito quando a corrente de fuga ultrapassa o limite especificado pelo dispositivo.

Nota

Valores usuais de corrente diferencial-residual: A corrente diferencial-residual nominal de atuação não é sempre igual a 30 [mA]. Esse valor é muito comum na proteção adicional de pessoas contra choques elétricos, pois está associado a limites fisiológicos de segurança: correntes dessa ordem, dependendo do percurso pelo corpo e do tempo de exposição, podem representar risco significativo ao organismo humano.
Valores de 10 [mA] podem ser empregados em situações especiais que exigem maior sensibilidade, como certos equipamentos portáteis, aplicações específicas ou ambientes nos quais se deseja reduzir ainda mais a corrente de fuga admissível. Por serem mais sensíveis, esses dispositivos podem estar mais sujeitos a atuações indesejadas caso existam correntes de fuga naturais na instalação.
O valor de 30 [mA] é amplamente utilizado em circuitos residenciais, comerciais e em aplicações de proteção adicional de pessoas. Já valores como 100 [mA] e 300 [mA] são empregados com finalidade diferente, especialmente para proteção contra efeitos de correntes de fuga que possam provocar aquecimento, degradação de isolamento ou risco de incêndio. Esses valores não devem ser tratados como proteção direta equivalente à proteção adicional de pessoas.
Portanto, a escolha de I_{Δ} deve considerar a finalidade do DR, o tipo de circuito, a corrente de fuga esperada, a seletividade entre dispositivos, a continuidade de serviço desejada e as recomendações normativas e do fabricante.

O DR não substitui o disjuntor termomagnético quando este não incorpora proteção contra sobrecorrente, pois sua função principal não é interromper sobrecargas ou curtos-circuitos.

Saiba Mais

Uso normativo e diferenças entre países: No Brasil, a aplicação de dispositivos diferenciais-residuais em instalações de baixa tensão é tratada pela **ABNT NBR 5410**, especialmente como medida de proteção em situações de maior risco de choque elétrico. Em outros países, a estratégia de proteção contra choques e faltas à terra segue princípios semelhantes, mas com nomenclaturas, dispositivos, esquemas de aterramento e exigências normativas próprias.
Por isso, não se deve presumir que a mesma solução adotada em uma instalação brasileira seja automaticamente válida em outro país. Em projetos internacionais ou em regiões de fronteira, devem ser consultadas as normas locais, os regulamentos da concessionária, as exigências de inspeção e os critérios de segurança aplicáveis.

6.5 Seletividade de proteção

A seletividade garante que apenas o trecho em falha seja desligado, evitando a interrupção total da instalação. Esse conceito é essencial em ambientes industriais, nos quais a parada de um alimentador geral pode comprometer processos produtivos, sistemas auxiliares e equipamentos críticos, especialmente quando a proteção é mal coordenada. A seletividade pode ser obtida por meio da coordenação entre correntes nominais, curvas de atuação, tempos de disparo e capacidades de interrupção. Em projetos mais complexos, pode ser necessário consultar tabelas de seletividade fornecidas por fabricantes ou realizar estudo específico de coordenação de proteção.

Definição

Seletividade: Define-se seletividade como a capacidade do sistema de proteção de atuar de forma coordenada, isolando apenas o circuito afetado pela falha e mantendo energizados os demais trechos da instalação que não foram atingidos. Esse princípio garante continuidade de serviço e maior confiabilidade da instalação, evitando desligamentos desnecessários e reduzindo impactos econômicos e operacionais. A seletividade é obtida pela correta escolha e ajuste dos dispositivos de proteção, considerando suas características de atuação, de modo que cada dispositivo opere apenas dentro da sua zona de responsabilidade. Em sistemas complexos, a seletividade pode envolver dispositivos instalados em cascata, coordenação entre disjuntores de diferentes fabricantes e análise detalhada das correntes de curto-circuito previstas, assegurando que a proteção seja eficaz sem comprometer a disponibilidade da instalação.

Na prática, a seletividade pode ser **total** ou **parcial**. A seletividade total ocorre quando, para toda a faixa de correntes de falta prevista, apenas o dispositivo imediatamente a montante do ponto de falha atua. A seletividade parcial ocorre quando essa coordenação é garantida apenas até determinado valor de corrente de curto-circuito. Acima desse limite, pode haver atuação simultânea ou atuação do dispositivo a montante.

Além disso, a seletividade pode envolver diferentes critérios:

- **Amperimétrica**: Obtida pela diferença entre correntes nominais ou limiares de atuação;
- **Cronológica**: Obtida por diferença de tempos de disparo;
- **Energética**: Associada à limitação de energia passante em dispositivos limitadores de corrente;
- **Diferencial**: Obtida pela coordenação entre DRs em cascata, usando dispositivos seletivos ou temporizados.

Nota

Terminologia: No contexto de instalações elétricas, utiliza-se frequentemente as expressões “a montante” e “a jusante” para indicar a posição relativa dos dispositivos de proteção ou dos elementos de um circuito:
- **A montante**: refere-se aos elementos localizados antes do ponto considerado, mais próximos da fonte de energia ou do alimentador principal. Por exemplo, um disjuntor geral está a montante dos disjuntores de circuitos terminais.
- **A jusante**: refere-se aos elementos situados depois do ponto considerado, mais próximos das cargas ou equipamentos alimentados. Por exemplo, os disjuntores de circuitos terminais estão a jusante do disjuntor geral.
Essa terminologia é essencial para compreender a coordenação e a seletividade da proteção, pois indica a hierarquia entre dispositivos instalados em cascata.

6.6 Fundamentos do aterramento

O sistema de aterramento tem como principal função garantir a segurança da instalação e das pessoas. Ele contribui para limitar diferenças de potencial perigosas, permitir a circulação de correntes de falta ou não previstas, estabilizar referências elétricas e favorecer a atuação dos dispositivos de proteção.

O estudo do aterramento em instalações elétricas deve ser relacionado a um conjunto de documentos normativos. Para instalações de baixa tensão, a referência central é a **ABNT NBR 5410** (ABNT NBR 5410, 2004). Em instalações de média tensão, deve-se considerar a **ABNT NBR 14039** (ABNT NBR 14039, 2005). A proteção contra descargas atmosféricas e a integração do aterramento com o sistema de proteção contra raios são tratadas pela série **ABNT NBR 5419** (ABNT NBR 5419, 2015). A medição de resistividade do solo e a análise geoelétrica para fins de aterramento são abordadas pela **ABNT NBR 7117** (ABNT NBR 7117, 2020). A segurança em instalações e serviços em eletricidade também deve observar a **NR-10** (NR-10, 2004).

Além dessas referências, projetos específicos podem exigir consulta a normas de concessionárias, normas internas de empresas, normas de áreas classificadas, requisitos específicos de equipamentos eletrônicos sensíveis, manuais de fabricantes e critérios de compatibilidade eletromagnética. Portanto, o aterramento deve ser tratado como parte de um sistema integrado de segurança elétrica, e não apenas como a instalação de hastes metálicas no solo.

Quando ocorre uma falha de isolamento, a corrente elétrica precisa de um caminho adequado para escoar, fornecido pela combinação entre condutores de proteção, massas metálicas interligadas, eletrodos de aterramento e demais elementos do sistema de proteção. De forma simplificada, a corrente de falta pode ser expressa por: $i_{\text{falta}} = V/Z$, em que i_{falta} é a corrente de falta, em ampere $[\text{A}]$, V é a diferença de potencial elétrico aplicada ao percurso da falta, em volt $[\text{V}]$, e Z é a impedância do percurso de falta, em ohm $[\Omega]$.

Importante

Impedância de aterramento: Quanto menor a impedância do percurso de falta, maior tende a ser a corrente de falta e mais rápida pode ser a atuação da proteção contra sobrecorrente. Entretanto, a segurança não depende apenas do valor da resistência de aterramento, mas também da equipotencialização, do esquema de aterramento adotado e da coordenação com os dispositivos de proteção.

Em esquemas nos quais a corrente de falta à terra pode ser limitada pela impedância do solo, dispositivos diferenciais-residuais podem ser necessários para garantir a desconexão automática da alimentação em condições de segurança.

Saiba Mais

Impedância elétrica: A **impedância** é a grandeza que representa a oposição total de um circuito à passagem da corrente elétrica em corrente alternada.
Diferentemente da resistência elétrica, que considera apenas a dissipação de energia em forma de calor, a impedância também inclui os efeitos de armazenamento temporário de energia em campos magnéticos e elétricos. Por isso, ela é representada por um número complexo, formado por parte real e parte imaginária:

$$Z = R + jX,$$

em que Z é a impedância, em ohm $[\Omega]$, R é a resistência, associada à parcela dissipativa da carga, e X é a reatância, associada ao armazenamento de energia em capacitores e indutores. Em cargas resistivas puras, a impedância é predominantemente real, isto é, $Z \approx R$, e a corrente fica em fase com a diferença de potencial elétrico. Em cargas indutivas, como motores e transformadores, a reatância é positiva, pois a energia é armazenada em campos magnéticos, fazendo a corrente atrasar em relação à diferença de potencial elétrico. Em cargas capacitivas, a reatância é negativa, pois a energia é armazenada em campos elétricos, fazendo a corrente se adiantar em relação à diferença de potencial elétrico. Assim, a impedância permite modelar matematicamente, em uma única grandeza, o comportamento resistivo, indutivo e capacitivo das cargas em corrente alternada.

6.6.1 Equipotencialização

A equipotencialização consiste na interligação das partes condutivas acessíveis, partes condutivas estranhas à instalação e condutores de proteção, de modo a reduzir diferenças de potencial perigosas durante uma falha elétrica.

Definição

Equipotencialização: Define-se equipotencialização como o processo de equalização ou equiparação de diferenças de potenciais elétricos entre partes condutivas, eliminando a possibilidade de fluxo de corrente e reduzindo os riscos de choque elétrico por contato simultâneo entre elementos que poderiam estar em potenciais diferentes.

Em uma instalação industrial, devem ser consideradas na equipotencialização estruturas metálicas, carcaças de máquinas, eletrocalhas, leitos metálicos, tubulações condutivas, quadros elétricos, blindagens metálicas, estruturas de sustentação, barramentos de proteção e demais elementos condutivos acessíveis, conforme aplicável ao projeto.

A equipotencialização é especialmente importante em ambientes com elevada umidade, presença de água, alta densidade de máquinas, pisos e estruturas condutivas extensas. Nessas condições, uma falha de isolamento pode estabelecer diferenças de potencial perigosas entre partes metálicas próximas. A interligação equipotencial reduz essa diferença e contribui para que a corrente de falta encontre um percurso previsível até o sistema de proteção.

! Importante

Função da equipotencialização: A equipotencialização não deve ser entendida apenas como uma exigência construtiva. Ela é uma medida de segurança que reduz a diferença de potencial entre partes simultaneamente acessíveis, favorece a atuação dos dispositivos de proteção e diminui o risco de choque elétrico por contato indireto.

Também é necessário distinguir o **aterramento** da **equipotencialização**, embora ambos atuem de forma complementar na segurança elétrica. O **aterramento** refere-se estritamente à ligação física e intencional de partes do sistema com a massa condutora da terra, visando dispersar correntes de falta e estabelecer uma referência de potencial, isto é, o "zero" elétrico. Por outro lado, a **equipotencialização** é o ato de interligar elementos condutivos entre si para garantir que estejam no mesmo nível de tensão, independentemente da conexão direta com o solo.

A diferença fundamental reside no objetivo: enquanto o aterramento busca "escoar" energia para o solo, a equipotencialização busca eliminar a diferença de potencial entre superfícies simultaneamente acessíveis, prevenindo o fluxo de corrente pelo corpo humano. Em uma instalação segura, o conceito de **aterramento de equipotencialização** surge como a síntese funcional de ambos: utiliza-se a malha de terra como o nó principal de interconexão para garantir que toda a estrutura esteja, simultaneamente, sem diferença de potencial entre suas partes e referenciada ao solo. Assim, evita-se que, durante uma descarga ou falha, surjam tensões perigosas entre carcaças metálicas vizinhas, mesmo que todas estejam individualmente ligadas à terra.

6.7 Esquemas de aterramento

Os sistemas de aterramento são classificados conforme a forma de ligação entre neutro, terra e massas da instalação. Essa classificação influencia diretamente a circulação da corrente de falta, a escolha dos dispositivos de proteção, a necessidade de DR e o tratamento do condutor de proteção.

A Figura 6.2 apresenta uma representação comparativa dos principais esquemas de aterramento, permitindo visualizar a relação entre fonte, condutor neutro, condutor de proteção, massas e eletrodo de aterramento.

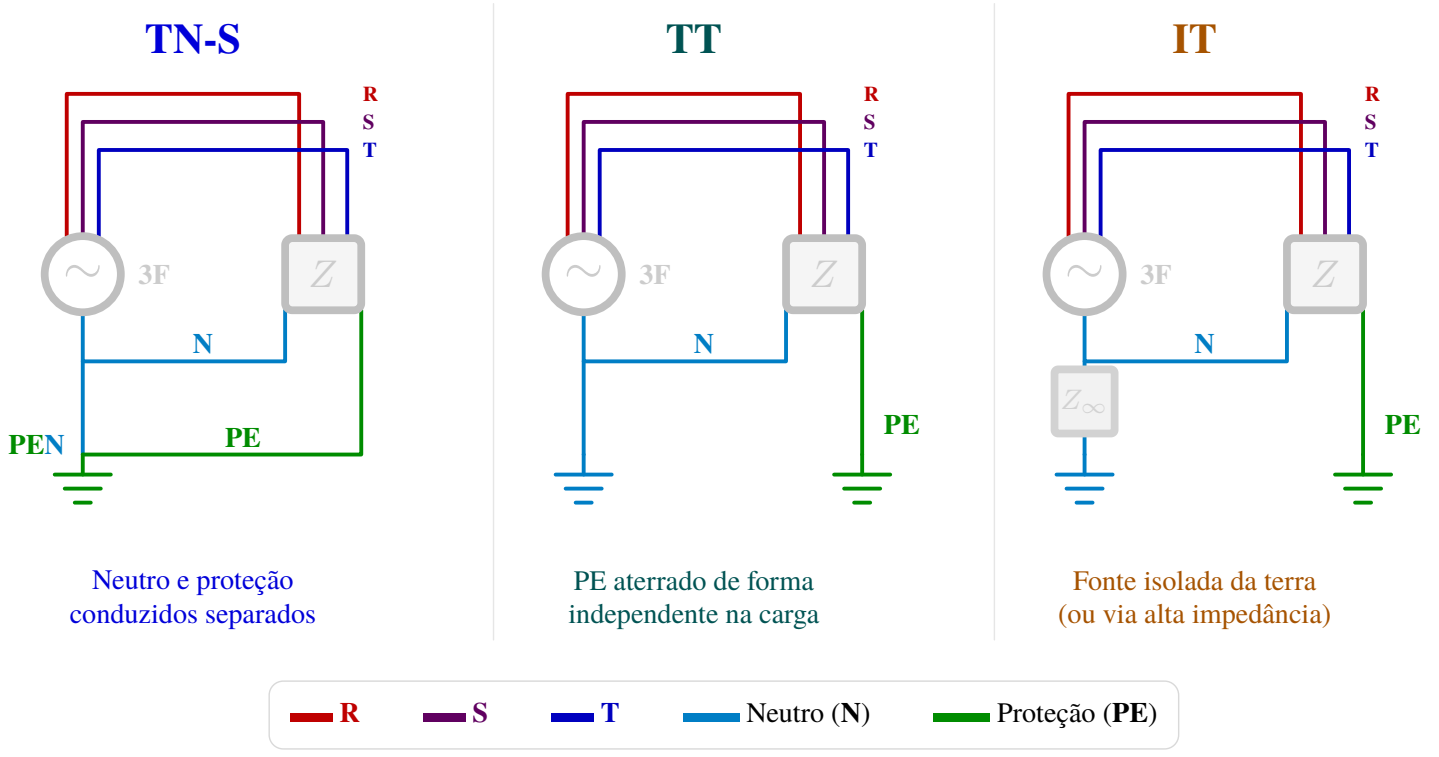

Figura 6.2: Principais esquemas de aterramento em baixa tensão.

Entre os esquemas mais relevantes em instalações de baixa tensão, destacam-se os esquemas TN, TT e IT. No esquema TN, a alimentação possui um ponto diretamente aterrado e as massas são ligadas a esse ponto por condutores de proteção. No esquema TT, a alimentação possui ponto aterrado, mas as massas da instalação são conectadas a eletrodos de aterramento próprios. No esquema IT, a fonte é isolada da terra ou ligada à terra por alta impedância, sendo utilizado em aplicações que exigem maior continuidade de serviço.

No esquema **TN**, a corrente de falta tende a retornar à fonte por um percurso metálico de baixa impedância, formado pelo condutor de proteção e pelo ponto aterrado da alimentação, conhecido comumente como *terra funcional* ou *aterramento funcional*. Essa característica favorece a atuação de dispositivos de proteção contra sobrecorrente, desde que a impedância do percurso de falta seja suficientemente baixa. Em prédios novos, instalações industriais organizadas e sistemas com infraestrutura elétrica bem definida, o esquema TN-S costuma ser tecnicamente vantajoso, pois mantém separados o condutor neutro e o condutor de proteção ao longo da instalação.

No esquema **TN-S**, o neutro (**N**) e o condutor de proteção (**PE**) permanecem separados em toda a instalação. Essa separação reduz a circulação de correntes funcionais pelo condutor de proteção, pois essas correntes predominam no neutro, melhora a organização do sistema de proteção e é adequada para instalações com equipamentos sensíveis, sistemas eletrônicos, automação industrial e cargas que exigem maior qualidade de energia.

No esquema **TN-C**, as funções de neutro e proteção são combinadas em um único condutor, denominado **PEN**. Essa configuração é frequentemente encontrada em trechos de redes de concessionárias ou em instalações executadas antes da revisão de **2004** da norma **NBR 5410**, período em que as restrições ao uso do condutor **PEN** em circuitos internos e de pequena seção, inferiores a $10\,[\text{mm}^2]$ em cobre, não eram tão rigorosas quanto as atuais. O uso desse esquema exige rigor técnico elevado e deve-se considerar que, em conformidade com as exigências normativas modernas, ele é incompatível com o uso de dispositivos DR. A interrupção do **PEN** pode colocar massas metálicas em potencial perigoso, pois o condutor que deveria servir como referência de proteção também conduz corrente funcional. Assim, sua aplicação em projetos contemporâneos deve ser limitada às condições permitidas pelas normas vigentes, priorizando-se a transição para esquemas como o TN-S em instalações novas ou reformas.

No esquema **TN-C-S**, há um trecho inicial com condutor PEN e posteriormente separação. Esse arranjo pode ocorrer em sistemas de distribuição ou em instalações reformadas. A separação deve ser feita em ponto tecnicamente adequado, com equipotencialização correta e sem recombinação indevida entre **N** e **PE** após a separação.

Aviso

Proteção elétrica e neutro: A interrupção do condutor **PEN**é uma falha crítica, pois as massas metálicas a jusante podem assumir o potencial de fase. Como o condutor desempenha simultaneamente as funções de proteção e neutro, sua integridade é vital para a referência de tensão e segurança. Por esse motivo, a norma NBR 5410 restringe seu uso a seções mínimas de $10\,[\text{mm}^2]$ em cobre, exigindo que sua aplicação seja criteriosamente analisada em projetos de baixa tensão, sendo terminantemente proibido em circuitos que alimentem áreas classificadas ou locais de serviços médicos.

No esquema **TT**, as massas da instalação são conectadas a um eletrodo de aterramento próprio, independente do aterramento da alimentação. Esse esquema é comum em instalações nas quais não se dispõe de um condutor de proteção fornecido pela rede ou em situações nas quais o projetista precisa implantar um aterramento local para as massas. Esse esquema de aterramento aparece geralmente em prédios antigos submetidos a reforma, pequenas edificações, instalações rurais, oficinas isoladas e unidades consumidoras com infraestrutura limitada. Este esquema aparece como solução prática, desde que sejam atendidos os critérios de segurança.

A principal característica do esquema TT é que a corrente de falta à terra pode ser limitada pela resistência do eletrodo de aterramento e do solo. Por isso, em muitos casos, a corrente de falta pode não ser suficientemente elevada para acionar rapidamente um disjuntor termomagnético. Nessa condição, o uso de dispositivo diferencial-residual torna-se fundamental para garantir a desconexão automática da alimentação em caso de fuga à terra.

Importante

Aterramento TT e dispositivo DR: No esquema TT, a proteção contra contatos indiretos exige a coordenação entre aterramento e equipotencialização. Como o percurso da falta inclui a terra, a alta impedância do solo limita a corrente a valores baixos, muitas vezes insuficientes para acionar disjuntores comuns. Por isso, o uso do dispositivo DR é essencial para garantir a desconexão automática da alimentação.

Em áreas com **alta umidade**, como lavanderias industriais, áreas externas, garagens, quintais, piscinas, casas de bombas, cozinhas industriais, estações de tratamento, ambientes laváveis ou locais sujeitos a condensação, o risco de fuga à terra e choque elétrico aumenta. Nessas situações, a escolha do esquema de aterramento deve ser acompanhada de proteção diferencial adequada, grau de proteção compatível dos invólucros, equipotencialização suplementar e inspeção periódica das condições de isolamento.

Em áreas com **solo de baixa resistividade**, tipicamente solos pantanosos, turfas, argilas, lodos agrícolas e solos de aluvião, o aterramento pode apresentar melhor desempenho elétrico, pois a resistência de dispersão tende a ser menor. Isso favorece a circulação de correntes de falta e a estabilização de potenciais. Entretanto, baixa resistência de aterramento não elimina a necessidade de equipotencialização nem substitui a correta seleção dos dispositivos de proteção. Já em solos de alta resistividade, pode ser necessário ampliar o sistema de eletrodos, utilizar malhas, hastes adicionais, anéis de aterramento ou soluções específicas definidas por medição e projeto.

Saiba Mais

Resistividade elétrica do solo: A resistividade elétrica do solo depende principalmente da umidade, da composição mineral, da porosidade, da compactação, da temperatura, da salinidade e da estratificação das camadas. Por isso, não se deve atribuir um valor fixo a um tipo de solo apenas por sua aparência; em projetos de aterramento, a resistividade deve ser medida em campo, conforme procedimento técnico adequado.
A condução elétrica no solo ocorre predominantemente pela água presente nos poros e pela movimentação de íons dissolvidos. Solos secos tendem a apresentar maior resistividade, solos úmidos com sais dissolvidos tendem a conduzir melhor. De forma simplificada, sais minerais liberam íons em solução, como no caso do cloreto de sódio:

$$\mathrm{NaCl(s)} \longrightarrow \mathrm{Na^{+}(aq)} + \mathrm{Cl^{-}(aq)}.$$

Processos naturais de dissolução mineral também podem aumentar a concentração de íons no solo. Em terrenos calcários, por exemplo, a água com dióxido de carbono dissolvido pode favorecer a formação de íons cálcio e bicarbonato:

$$\mathrm{CaCO_3(s)} + \mathrm{CO_2(aq)} + \mathrm{H_2O(l)} \longrightarrow \mathrm{Ca^{2+}(aq)} + 2\,\mathrm{HCO_3^{-}(aq)}.$$

A resistividade elétrica ρ é inversamente relacionada à condutividade elétrica σ: $\rho = \sigma^{-1}$.
No Brasil, solos tipicamente associados a **maior resistividade** incluem solos arenosos secos, solos pedregosos, solos rasos sobre rocha cristalina, áreas de cerrado com baixa umidade superficial, regiões semiáridas e terrenos com afloramentos rochosos. Nesses casos, a baixa umidade, a maior presença de vazios preenchidos por ar e a menor concentração de íons dissolvidos dificultam a condução elétrica. Por outro lado, solos tipicamente associados a **menor resistividade** incluem solos argilosos úmidos, solos aluviais de várzea, terrenos com lençol freático raso, áreas de mangue, solos orgânicos úmidos e regiões litorâneas ou salinas. Nesses ambientes, a retenção de água e a presença de íons dissolvidos favorecem a condução elétrica, reduzindo a resistividade aparente do terreno.
Também se deve observar que a resistividade do solo varia ao longo do ano. Em períodos secos, a perda de umidade pode elevar a resistência de aterramento; em períodos chuvosos, a infiltração de água pode reduzi-la temporariamente. Além disso, camadas profundas podem apresentar comportamento diferente da superfície, especialmente quando há estratificação entre solo orgânico, argila, areia, rocha alterada ou rocha sã.
Solos secos, arenosos e rochosos dificultam baixas resistências de aterramento, enquanto solos úmidos, argilosos ou salinos favorecem o desempenho. A decisão técnica deve sempre considerar medições locais, pois fatores como umidade sazonal e camadas profundas podem alterar os resultados.

No esquema **IT**, a fonte é isolada da terra ou conectada à terra por uma impedância elevada. Como consequência, a primeira falta à terra pode produzir corrente limitada, permitindo a continuidade de serviço em aplicações nas quais a interrupção imediata seria indesejável. Esse esquema é utilizado em situações específicas, como alguns processos industriais contínuos, salas cirúrgicas, sistemas de segurança, mineração, instalações especiais e ambientes nos quais a continuidade de operação deve ser priorizada.

Saiba Mais

Continuidade de serviço em esquemas IT: Em esquemas de aterramento IT, a fonte de alimentação é isolada da terra ou conectada a ela por meio de uma impedância elevada. Por esse motivo, quando ocorre uma primeira falha de isolamento entre uma fase e uma massa ou entre uma fase e a terra, a corrente de falta tende a ser limitada pela elevada impedância do percurso de retorno. Diferentemente de esquemas nos quais a falta fase-terra produz uma corrente elevada e provoca desligamento imediato, no esquema IT a primeira falta pode gerar apenas uma corrente reduzida, insuficiente para exigir a interrupção automática imediata do circuito.
Essa característica torna o esquema IT especialmente interessante em aplicações nas quais a continuidade de serviço é crítica, como centros cirúrgicos, processos industriais contínuos, mineração, sistemas navais, instalações petroquímicas e circuitos de comando ou segurança. Nessas situações, o desligamento repentino da alimentação pode representar risco operacional, perda de produção, dano a equipamentos ou comprometimento da segurança de pessoas. Assim, o esquema IT permite que a instalação continue operando após a primeira falha de isolamento, desde que essa condição seja detectada, sinalizada e corrigida rapidamente.

A continuidade de serviço não significa ausência de risco. Em esquemas IT, é indispensável o uso de dispositivos de supervisão de isolamento, para monitorar continuamente a resistência de isolamento entre os condutores ativos e a terra. Quando a primeira falha ocorre, o sistema deve alarmar para que se localize e corrija o defeito antes que uma segunda falha apareça em outro condutor ativo. A segunda falha pode criar uma condição equivalente a curto-circuito entre fases ou entre condutores ativos, exigindo a atuação dos dispositivos de proteção.

Portanto, a preferência pelo esquema IT em aplicações críticas decorre da possibilidade de manter a alimentação durante a primeira falha de isolamento, evitando desligamentos imediatos e aumentando a disponibilidade do sistema. Essa vantagem, contudo, exige projeto cuidadoso, supervisão permanente do isolamento, manutenção disciplinada e coordenação adequada dos dispositivos de proteção.

Entretanto, o esquema IT exige supervisão permanente do isolamento. A primeira falta deve ser detectada e sinalizada por dispositivo supervisor de isolamento, para que a manutenção seja realizada antes da ocorrência de uma segunda falta. Caso ocorra uma segunda falta em outro condutor ativo, a situação pode evoluir para uma condição equivalente a curto-circuito entre fases ou entre fase e massa, exigindo atuação rápida da proteção.

Aplicação Prática

Escolha do esquema de aterramento: Em prédios novos e instalações industriais com infraestrutura bem controlada, o esquema TN-S costuma oferecer boa organização do sistema de proteção. Em prédios antigos ou reformas, pode ser necessário compatibilizar o esquema existente com novas exigências de segurança, frequentemente com reforço de equipotencialização e uso de DR. Em instalações isoladas ou com aterramento próprio das massas, o esquema TT pode ser adotado, desde que a proteção diferencial seja corretamente especificada. Em processos que exigem continuidade de serviço, o esquema IT pode ser preferido, desde que haja supervisão de isolamento e manutenção qualificada.

A escolha do esquema de aterramento deve considerar as características da rede de alimentação, a continuidade de serviço desejada, a impedância do percurso de falta, a presença de cargas sensíveis, a manutenção disponível, o tipo de edificação, a resistividade do solo, as condições ambientais e as exigências normativas (ABNT NBR 5410, 2004; ABNT NBR 14039, 2005; ABNT NBR 5419, 2015; ABNT NBR 7117, 2020). Em qualquer caso, o aterramento deve ser entendido como parte de um sistema de proteção integrado, e não como elemento isolado.

6.8 Resumo do capítulo

Neste capítulo, foram apresentados os fundamentos da proteção elétrica e dos sistemas de aterramento em instalações de baixa tensão, com ênfase na segurança de pessoas, na preservação dos equipamentos e na continuidade operacional. Mostrou-se que dispositivos de proteção, aterramento e equipotencialização atuam de forma integrada para limitar correntes anormais, controlar potenciais perigosos e reduzir riscos de choque elétrico, incêndios e danos à instalação. Foram discutidos os efeitos térmicos, eletrodinâmicos e fisiológicos das correntes anormais, a partir dos quais foram caracterizadas as condições de sobrecarga, curto-circuito e corrente de fuga à terra.

Foram estudados os disjuntores termomagnéticos, distinguindo-se a atuação térmica, associada à proteção temporizada contra sobrecargas, e a atuação magnética, associada à interrupção rápida de curtos-circuitos. Apresentou-se o critério básico de coordenação $I_B \leq I_n \leq I_Z$, além das curvas típicas de disparo e suas aplicações. Também foram analisados os dispositivos diferenciais-residuais, empregados na proteção contra choques elétricos, na detecção de correntes de fuga e, em algumas aplicações, na prevenção de incêndios, destacando-se os tipos IDR, DDR, MDR, SDR e as classificações AC, A, F, B e S.

A seletividade de proteção foi apresentada como requisito para evitar desligamentos desnecessários de grandes trechos da instalação, especialmente em ambientes industriais. Foram discutidas a seletividade total e parcial e as formas de coordenação amperimétrica, cronológica, energética e diferencial. Na sequência, foram desenvolvidos os fundamentos do aterramento e da equipotencialização, relacionando-os à circulação de correntes de falta, à impedância do percurso, aos eletrodos, aos condutores de proteção e à redução de diferenças de potencial entre partes simultaneamente acessíveis.

Por fim, foram apresentados os principais esquemas de aterramento em baixa tensão: TN, TT e IT, incluindo variações como TN-S, TN-C e TN-C-S. Destacaram-se a separação entre neutro e proteção no TN-S, os cuidados com o condutor **PEN** no TN-C, a importância do DR no esquema TT e a continuidade de serviço no esquema IT mediante supervisão de isolamento. Conclui-se que proteção e aterramento devem ser concebidos como um sistema único de segurança elétrica, considerando correntes de projeto, de curto-circuito e de fuga, resistividade do solo, condições ambientais, continuidade de serviço e exigências normativas aplicáveis.

Parte II

Organização da instalação e cálculo de demanda

Capítulo 7

Interpretação de planta e organização do projeto

7.1 Introdução

A elaboração de um projeto elétrico envolve diferentes etapas técnicas, já contextualizadas no Capítulo 1. Neste capítulo, o foco será mais específico: compreender como a planta arquitetônica e o arranjo físico das cargas servem de base para a organização espacial da instalação elétrica. Diferentemente das representações esquemáticas, como os diagramas unifilares, a planta baixa permite visualizar a disposição real dos equipamentos, as rotas possíveis para a infraestrutura elétrica, os limites físicos da edificação e as interferências com outros sistemas prediais e industriais (Crespo, 2015; ABNT NBR 5410, 2004).

Em instalações industriais, essa leitura possui importância particular, pois motores, máquinas, quadros, eletrocalhas, áreas de circulação, estruturas metálicas e pontos de alimentação devem ser compatibilizados antes da definição final dos circuitos. Uma escolha inadequada de trajetos ou de posicionamento de quadros pode aumentar o comprimento dos condutores, elevar a queda de tensão, dificultar a manutenção e ampliar os custos de instalação.

A planta elétrica não deve ser entendida apenas como uma representação gráfica. Ela constitui um documento técnico de decisão, pois relaciona espaço físico, cargas elétricas, infraestrutura, critérios de manutenção, segurança operacional e possibilidades de expansão futura. Desse modo, a interpretação adequada da planta baixa permite que os cálculos elétricos estudados nos capítulos anteriores sejam aplicados sobre uma base física realista e executável.

O objetivo deste capítulo consiste em estabelecer diretrizes para a leitura técnica de plantas, a interpretação de simbologia elétrica e a organização espacial do sistema de distribuição. Busca-se complementar os fundamentos gerais de projeto apresentados no Capítulo 1 e conectar esses fundamentos às grandezas elétricas estudadas no Capítulo 2, especialmente potência, corrente, queda de tensão, fator de potência e valores nominais das cargas.

7.2 Desenvolvimento teórico

Conforme discutido na Seção 1.2.2, o desenvolvimento de um projeto elétrico industrial é um processo iterativo, composto por levantamento de requisitos, análise normativa, concepção, cálculos, validação e documentação. Neste capítulo, essas etapas não serão repetidas em detalhe; o interesse principal está em mostrar como a planta baixa participa de cada decisão prática do projeto.

A interpretação correta da planta arquitetônica constitui a base para decisões como posicionamento de quadros, definição de trajetos, setorização de cargas, escolha de infraestrutura e posterior dimensionamento de circuitos. Embora o cálculo elétrico seja essencial, ele não deve ser tratado de forma isolada. A corrente de projeto, a queda de tensão e a seleção dos condutores dependem também de informações espaciais, como distância entre quadro e carga, método de instalação, agrupamento de circuitos e condições ambientais.

Em um projeto tecnicamente consistente, os desenhos, tabelas e memoriais devem apresentar coerência entre si. O ponto indicado na planta deve corresponder ao circuito listado no quadro de cargas; o circuito indicado no quadro deve aparecer no diagrama unifilar; e o condutor dimensionado no memorial deve ser compatível com o trajeto, o método de instalação e a proteção indicada no projeto executivo.

7.2.1 Integração da planta às etapas do projeto

As etapas gerais de elaboração do projeto elétrico já foram apresentadas no Capítulo 1, especialmente na Figura 1.1. A partir deste ponto, a planta baixa será tratada como o documento que transforma essas etapas em decisões espaciais verificáveis. Assim, não se trata de redefinir o processo de projeto, mas de compreender como cada etapa se manifesta no desenho técnico.

Na fase de levantamento de requisitos, a planta permite localizar cargas, reconhecer setores, identificar acessos, prever áreas técnicas e registrar restrições físicas. Na concepção inicial, ela auxilia na escolha preliminar dos quadros, dos trajetos principais e da divisão da instalação por áreas funcionais. No detalhamento técnico, a planta passa a receber a identificação dos circuitos, os percursos de infraestrutura, a localização dos dispositivos e a correspondência com quadro de cargas, diagrama unifilar e memorial de cálculo.

! Importante

Projeto executivo: A planta elétrica detalhada deve permitir a execução da instalação sem necessidade de interpretação adicional. Para isso, devem estar indicados os circuitos, trajetos, quadros, pontos de utilização, identificação dos condutores e informações necessárias para montagem, inspeção e conferência.

Essa integração também favorece o controle de revisões. Alterações realizadas em fases iniciais tendem a ter menor custo e menor impacto. Já modificações realizadas durante a execução podem exigir retrabalho, substituição de materiais, revisão de cálculos e readequação de infraestrutura. Por isso, a leitura correta da planta desde as primeiras etapas reduz incertezas técnicas e melhora a qualidade final do projeto.

7.2.2 Leitura e interpretação da planta baixa

A planta baixa representa a edificação em vista superior, permitindo a análise do espaço físico onde a instalação será implementada. Por meio dela, identificam-se ambientes, paredes, acessos, pilares, máquinas, áreas técnicas, rotas de circulação e possíveis locais para instalação de quadros e infraestrutura.

Durante a leitura da planta, devem ser observados os seguintes aspectos:

- **Escala**: permite converter medidas do desenho em dimensões reais, sendo indispensável para estimar comprimentos de circuitos e trajetos de infraestrutura;
- **Elementos estruturais**: pilares, vigas, paredes, lajes e aberturas influenciam a passagem de eletrodutos, eletrocalhas e cabos;
- **Ambiente**: condições como umidade, poeira, temperatura, presença de agentes corrosivos ou risco mecânico definem o grau de proteção dos equipamentos;
- **Posição das cargas**: máquinas e equipamentos devem ser localizados para permitir definição de circuitos, quedas de tensão e rotas de alimentação;
- **Acessibilidade**: quadros, dispositivos de manobra e pontos de manutenção devem ser instalados em locais seguros e acessíveis.

A Figura 7.1 apresenta uma planta baixa industrial simplificada, utilizada como exemplo didático para mostrar a relação entre setores, quadros, trajetos de infraestrutura, cargas e centro de carga.

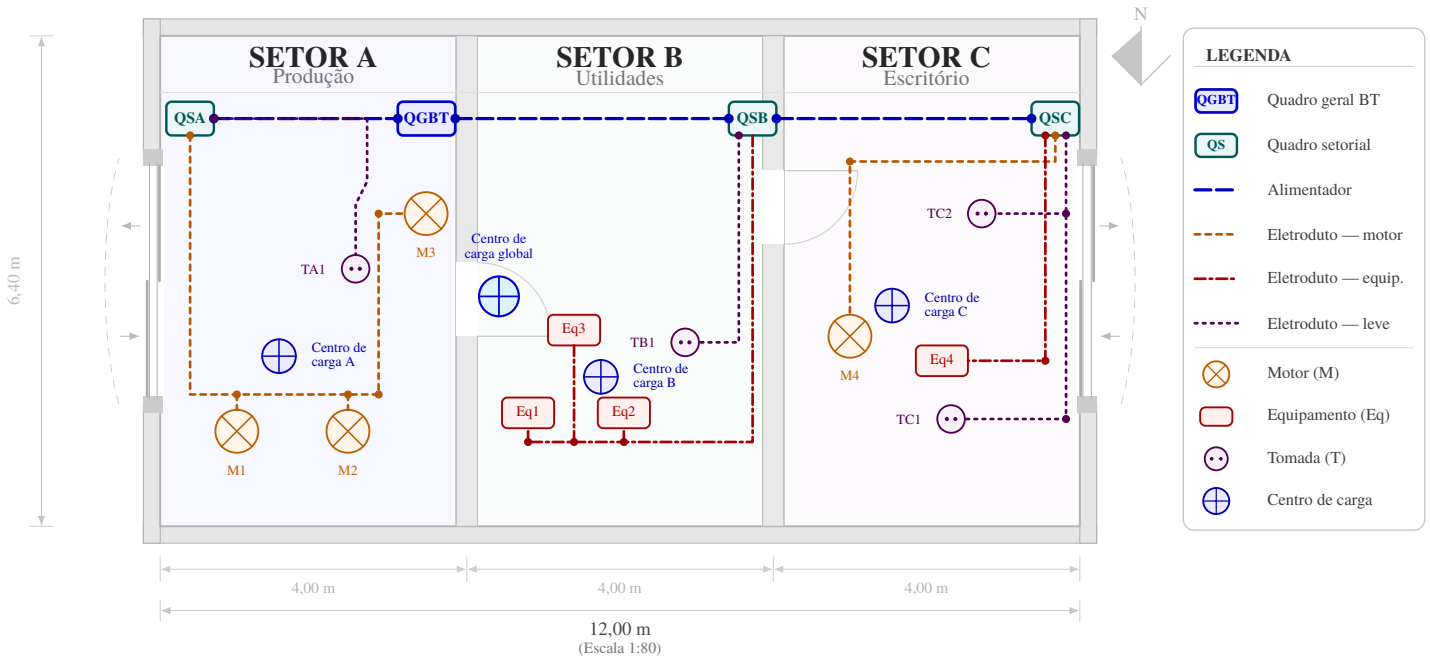

Figura 7.1: Planta baixa industrial simplificada com setorização da edificação, posicionamento de quadros, trajetos de infraestrutura, cargas representativas e indicação do centro de carga.

Definição

Centro de carga: Posição de referência associada à distribuição espacial das cargas elétricas. Seu uso auxilia no posicionamento de quadros e alimentadores, buscando reduzir comprimentos de cabos, perdas elétricas e quedas de tensão. É possível que, fora do centro de carga, existam configurações e especificações de projeto que tenham maior importância; assim, este conceito funciona apenas como uma referência técnica e não como uma regra absoluta.

Aplicação Prática

Interpretação da planta baixa: A Figura 7.1 apresenta uma planta baixa industrial simplificada, organizada em três setores funcionais: produção, utilidades e escritório. A representação combina elementos arquitetônicos, como paredes, portas, portões deslizantes e dimensões principais, com elementos elétricos, como o *quadro geral de baixa tensão* (QGBT), quadros setoriais ou *quadros secundários* (QS), alimentadores, eletrodutos e cargas representativas. Dependendo da organização adotada no projeto, esses QS também podem ser entendidos como quadros secundários. Essa integração permite visualizar que a organização elétrica da instalação depende tanto da posição física dos equipamentos quanto da forma como eles serão alimentados e distribuídos no espaço.

Os centros de carga indicados em cada setor não devem ser interpretados como pontos exclusivamente geométricos. Eles representam posições de referência obtidas a partir da distribuição das cargas do setor, considerando sua localização e sua relevância elétrica. Assim, em um setor com motores ou equipamentos de maior potência concentrados em determinada região, o centro de carga tende a se deslocar em direção a essas cargas, pois elas influenciam mais intensamente a definição dos trajetos, dos quadros e dos alimentadores.

Na figura, os centros de carga dos setores A, B e C servem como apoio à análise local de cada área, enquanto o centro de carga global representa uma referência geral para a instalação. Esses pontos não são ligações elétricas nem componentes físicos obrigatórios; são marcadores de projeto utilizados para orientar decisões como posicionamento de quadros, rotas de infraestrutura, comprimento de condutores, possibilidade de expansão e facilidade de manutenção.

Saiba Mais

Analogia: O cálculo do centro de carga em um sistema elétrico utiliza o mesmo princípio matemático do **centro de massa** ou do **centro de gravidade** em sistemas mecânicos. Enquanto na mecânica busca-se o ponto onde a massa total pode ser considerada concentrada para equilibrar momentos, na elétrica busca-se o ponto que minimiza os "momentos elétricos", isto é, produtos da carga pela distância, reduzindo quedas de tensão e custos com condutores.
As coordenadas do centro de carga $(\bar{x}, \bar{y})$ são obtidas pela média ponderada das coordenadas (x_k, y_k) de cada carga individual, utilizando a potência ou a corrente como fator de ponderação:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{k=1}^{n}(P_k \cdot x_k)}{\sum_{k=1}^{n} P_k} \qquad \text{e} \qquad \bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^{n}(P_k \cdot y_k)}{\sum_{k=1}^{n} P_k}, \tag{7.1}$$

onde:

- P_k é a potência instalada ou a demanda da carga k, em watt [W] ou volt-ampere [VA];
- x_k e y_k são as coordenadas espaciais da carga k no plano da planta baixa.

Assim como o centro de massa de um objeto irregular se desloca para a região de maior densidade de matéria, o centro de carga de uma indústria se deslocará para perto dos maiores motores, fornos ou conjuntos de circuitos, no sentido de maior potência instalada ou maior demanda. Esse ponto auxilia na identificação de locais mais adequados para o posicionamento de quadros de distribuição e alimentadores.

7.2.3 Simbologia e convenções técnicas

A simbologia padronizada atua como o alfabeto da engenharia elétrica, permitindo que o projeto seja interpretado de forma unívoca por projetistas, instaladores e equipes de manutenção. Como a planta elétrica é um documento de responsabilidade técnica, sua representação deve ser clara e livre de ambiguidades, funcionando como uma linguagem técnica que transpõe o cálculo teórico para a execução física.

No Brasil, o cenário normativo da simbologia passou por transições importantes. Tradicionalmente, as normas **ABNT NBR 5444**, aplicável a instalações prediais, e **ABNT NBR 5445** e **ABNT NBR 5446**, associadas a diagramas e eletricidade, consolidaram a linguagem gráfica nacional. Entretanto, com o cancelamento da **ABNT NBR 5444**, o setor técnico passou a convergir para as séries internacionais da **IEC 60617**, adotadas no Brasil como **ABNT NBR IEC 60617**, que padronizam símbolos para diagramas e esquemas elétricos em um contexto globalizado. Apesar dessa transição, a simbologia da antiga **ABNT NBR 5444** ainda é amplamente encontrada em softwares de CAD e em acervos de instalações existentes, exigindo que o profissional moderno seja "bilíngue" em termos de representação gráfica.

Independentemente da norma de referência adotada, a validade técnica de um projeto depende da sua **legenda**. Ela deve ser coerente com a **ABNT NBR 5410**, garantindo que dispositivos de proteção, condutores e pontos de carga estejam perfeitamente identificados e correlacionados com o diagrama unifilar e o memorial de cálculo. Em ambientes industriais, essa precisão é vital, pois a ausência de padronização pode levar a erros de montagem, falhas de coordenação de proteção e acidentes durante manutenções preventivas ou corretivas.

Nota

Simbologia: Embora normas como a **ABNT NBR 5444** tenham sido canceladas, elas permanecem como referências históricas e práticas no mercado brasileiro. Em projetos contemporâneos, recomenda-se priorizar as normas da série **ABNT NBR IEC 60617**. Todavia, a prática mais segura e profissional é incluir sempre uma legenda detalhada na folha do projeto, explicitando o significado de cada símbolo utilizado, independentemente da sua origem normativa.

A Tabela 7.1 apresenta uma categorização funcional de elementos comuns em projetos elétricos industriais. A tabela não substitui a legenda específica do projeto, mas ajuda a compreender a finalidade técnica de cada categoria.

Tabela 7.1: Categorização funcional de elementos comuns em projetos elétricos industriais

Categoria	Elemento	Função
Distribuição	Quadro elétrico	Abrigar dispositivos de proteção, manobra, seccionamento, medição e distribuição de circuitos.
Condução	Eletroduto	Proteger mecanicamente os condutores e organizar sua passagem em trechos embutidos ou aparentes.
Infraestrutura	Eletrocalha	Permitir o encaminhamento organizado de conjuntos de cabos, facilitando inspeção, ampliação e manutenção.
Alimentação	Condutor fase	Transportar energia elétrica até as cargas, estando normalmente associado aos condutores ativos do circuito.
Referência	Condutor neutro	Servir como condutor de retorno e referência de potencial em sistemas que utilizam neutro funcional.
Proteção	Condutor **PE**	Interligar massas ao sistema de proteção contra choques elétricos e favorecer a atuação dos dispositivos de proteção.
Identificação	Código de circuito	Relacionar pontos, quadros, condutores e proteções de forma rastreável entre planta, quadro de cargas e diagrama unifilar.

Além dos símbolos, devem ser utilizadas convenções de identificação. Circuitos podem ser numerados, quadros podem receber códigos próprios e os condutores devem ser indicados conforme sua função. Essa padronização reduz ambiguidades e facilita a conferência entre planta, quadro de cargas, diagrama unifilar e memorial de cálculo.

! Importante

Consistência documental: A simbologia utilizada na planta deve ser compatível com a legenda, com o quadro de cargas e com o diagrama unifilar. A mesma carga não deve aparecer com identificações diferentes em documentos distintos do mesmo projeto. É importante prever uma metodologia para garantir consistência semiótica entre desenhos, tabelas, diagramas e memoriais.

7.2.4 Organização espacial do projeto

A estrutura hierárquica geral de uma instalação elétrica industrial foi apresentada na Seção 1.2.4. Nesta seção, essa hierarquia é retomada apenas sob o ponto de vista espacial: como posicionar quadros, trajetos e circuitos na planta para reduzir perdas, facilitar manutenção e permitir futuras ampliações.

A organização espacial pode seguir uma sequência de verificação:

1. Localizar o ponto de entrega ou a origem da alimentação;
2. Posicionar o QGBT ou quadro principal em local tecnicamente adequado;
3. Dividir a instalação por áreas, pavimentos, processos ou grupos de cargas;
4. Definir os trajetos principais de infraestrutura;
5. Posicionar os quadros secundários próximos aos grupos de carga, quando tecnicamente conveniente;
6. Definir os circuitos terminais até as cargas.

Essa sequência não deve ser entendida como rígida. Em muitos projetos, o posicionamento dos quadros e o traçado das infraestruturas passam por sucessivas revisões, pois dependem da compatibilização com arquitetura, estruturas, tubulações hidráulicas, sistemas de ar comprimido, ventilação, combate a incêndio, máquinas e áreas de circulação.

A posição dos quadros deve equilibrar critérios elétricos, construtivos e operacionais. Em geral, quadros próximos às cargas reduzem o comprimento dos circuitos terminais, mas devem permanecer em locais acessíveis, protegidos contra agentes agressivos e compatíveis com as condições de operação da instalação.

Aplicação Prática

Exemplo prático: Considere uma oficina industrial alimentada por um **quadro geral de baixa tensão (QGBT)**, a partir do qual deve ser atendido um **quadro secundário (QS)** responsável por um conjunto de motores trifásicos. A posição do QS deve ser definida avaliando comprimento dos cabos, queda de potencial elétrico, custo dos condutores, facilidade de manutenção e condições ambientais do local. A disposição funcional analisada é: QGBT—QS—motores.
No primeiro caso, o QS é instalado próximo ao QGBT. Essa solução reduz o comprimento do alimentador entre o QGBT e o QS, o que pode ser vantajoso porque esse alimentador conduz a potência total do conjunto de motores e, portanto, tende a exigir condutores de maior seção. Nesse arranjo, evita-se um alimentador principal longo com condutores de grande seção, reduzindo custo, perdas e queda de potencial elétrico no trecho principal. Entretanto, os circuitos terminais entre o QS e cada motor tornam-se mais longos, exigindo verificação individual da queda de potencial elétrico, da proteção e do método de instalação de cada circuito de motor.
No segundo caso, o QS é instalado próximo ao conjunto de motores. Essa solução encurta os circuitos terminais, facilita a operação local, simplifica a manutenção dos motores e reduz a queda de potencial elétrico nos trechos finais. Contudo, o alimentador entre o QGBT e o QS passa a ser mais longo e deve transportar a potência total do grupo, podendo exigir condutores de maior seção ao longo de uma distância significativa. Assim, essa alternativa pode aumentar o custo do alimentador principal, embora melhore a organização e a manutenção junto às cargas.
Portanto, a melhor posição do QS não é definida apenas pela menor distância geométrica entre a fonte e as cargas. O projetista deve comparar as alternativas, verificando a queda de potencial elétrico no alimentador e nos circuitos terminais, o custo total dos cabos, a acessibilidade dos quadros, a proteção contra impactos, a exposição a calor, umidade ou poeira condutiva, além da possibilidade de expansão futura.

Importante

Relação com o dimensionamento: O comprimento dos circuitos influencia diretamente a queda de diferença de potencial elétrico, as perdas por efeito Joule e a escolha da seção dos condutores. Por isso, a posição dos quadros, o trajeto dos eletrodutos e a distribuição das cargas afetam o custo da instalação, o aquecimento dos cabos e o desempenho dos equipamentos alimentados.
De forma simplificada, a resistência elétrica de um condutor pode ser estimada por:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \tag{7.2}$$

em que R é a resistência elétrica $[\Omega]$, ρ é a resistividade do material, l é o comprimento do condutor e S é a seção transversal. Assim, para um mesmo material e uma mesma seção, quanto maior for o percurso, maior será a resistência elétrica e, consequentemente, maior tenderá a ser a queda de diferença de potencial elétrico.
Em uma aproximação puramente resistiva, a queda pode ser interpretada conceitualmente por:

$$\Delta V \approx R \cdot I.$$

Quando l representa a distância entre o quadro e a carga, em circuitos monofásicos deve-se considerar o percurso de ida e retorno da corrente, o que justifica o fator 2:

$$\Delta V \approx 2 \cdot R \cdot I.$$

Em circuitos trifásicos equilibrados, a queda entre fases resulta de uma relação fasorial entre grandezas defasadas de $120°$, sendo usual a aproximação:

$$\Delta V \approx \sqrt{3} \cdot R \cdot I.$$

Essas expressões têm finalidade apenas introdutória. O cálculo formal, incluindo reatância dos condutores, fator de potência, temperatura de operação, método de instalação e critérios normativos, será desenvolvido no Capítulo 11.

A setorização, no sentido de contingência controlada e de controle pré-definido de falhas, também contribui para a seletividade da proteção e para a continuidade de serviço. Quando os circuitos são bem organizados, uma falha localizada tende a afetar apenas o setor correspondente, sem desligar áreas não envolvidas na ocorrência.

Em instalações industriais, a setorização pode seguir critérios físicos ou funcionais. Um setor físico pode corresponder a um pavimento, galpão, sala técnica ou área externa. Um setor funcional pode agrupar cargas de um mesmo processo, como bombeamento, ventilação, produção, utilidades, iluminação ou automação. A escolha adequada depende da operação da planta, da criticidade das cargas e da facilidade de manutenção.

7.3 Resumo do capítulo

Neste capítulo, foi discutida a interpretação da planta baixa como etapa fundamental para a organização espacial do projeto elétrico. Diferentemente das representações esquemáticas, isto é, das representações técnicas dos circuitos elétricos, como o diagrama unifilar, a planta permite relacionar as decisões elétricas com a disposição física da edificação, das cargas, dos quadros, dos acessos, das áreas técnicas e das rotas possíveis de infraestrutura.

Foi mostrado que a planta baixa não deve ser interpretada apenas como um desenho arquitetônico, mas como um documento técnico de decisão. Por meio dela, o projetista identifica estrategicamente restrições construtivas, condições ambientais, possibilidades de passagem de eletrodutos e eletrocalhas, áreas de manutenção, localização das cargas e alternativas para posicionamento de quadros. Dessa forma, a produção, o desenho e a interpretação correta da planta influenciam diretamente o comprimento dos circuitos, a queda de potencial elétrico, o custo dos condutores, a acessibilidade dos equipamentos e a possibilidade de expansão futura.

Também foi apresentada a integração entre a planta baixa e as etapas gerais do projeto elétrico, já discutidas no Capítulo 1. A planta atua como base física para o levantamento de requisitos, a concepção inicial, a definição dos quadros, a organização dos circuitos, o detalhamento técnico e a conferência documental. Assim, o ponto indicado na planta deve corresponder ao circuito listado no quadro de cargas, ao dispositivo indicado no diagrama unifilar e ao condutor dimensionado no memorial de cálculo.

A Figura 7.1 foi utilizada para representar uma instalação industrial simplificada, com setorização da edificação, posicionamento do QGBT, quadros secundários, alimentadores, eletrodutos, cargas representativas e centros de carga. A partir dessa figura, destacou-se que o centro de carga não é apenas um ponto geométrico, mas uma referência ponderada pela posição e pela relevância elétrica das cargas. Por isso, cargas de maior potência, como motores e equipamentos industriais, deslocam o centro de carga em sua direção e influenciam a definição dos trajetos e do posicionamento dos quadros, objetivando minimizar custos, quedas de tensão e outros fatores.

Foram discutidas ainda a necessidade de simbologia e a existência de convenções técnicas utilizadas em plantas elétricas. Ressaltou-se que a legenda do projeto é indispensável para garantir a interpretação inequívoca dos símbolos, especialmente em um contexto de transição entre simbologias tradicionalmente usadas no Brasil e referências mais recentes associadas à série **ABNT NBR IEC 60617**. A consistência entre simbologia, identificação dos circuitos, quadro de cargas, diagrama unifilar e memorial de cálculo foi destacada como condição essencial para evitar ambiguidades e erros de execução. Não se propôs uma simbologia própria, pois outras obras, especialmente normas técnicas e bibliotecas de símbolos, já cumprem essa função.

Por fim, analisou-se a organização espacial do projeto, com atenção ao posicionamento do QGBT, dos quadros secundários e das cargas. Foi mostrado que instalar um quadro secundário próximo ao QGBT pode reduzir o comprimento de um alimentador principal de maior seção, enquanto instalá-lo próximo ao conjunto de cargas pode reduzir os circuitos terminais e facilitar a manutenção local. Conclui-se que a melhor solução depende da comparação entre queda de potencial elétrico, custo dos cabos, acessibilidade, condições ambientais, proteção mecânica, seletividade, continuidade de serviço e possibilidade de expansão futura.

Capítulo 8

Levantamento de cargas

8.1 Introdução

O levantamento de cargas constitui uma etapa fundamental para o dimensionamento de instalações elétricas prediais e industriais, pois transforma informações dispersas de campo em dados técnicos organizados para o projeto (ABNT NBR 5410, 2004; Crespo, 2015). Conforme discutido no Capítulo 1, na Figura 1.1, o projeto elétrico depende da execução iterativa de uma sequência de decisões técnicas encadeadas; neste capítulo, o foco recai sobre a primeira organização quantitativa das cargas que serão alimentadas pela instalação.

A partir da planta baixa, dos memoriais de arquitetura, das listas de equipamentos, das placas de identificação, dos catálogos de fabricantes e dos requisitos do processo produtivo, o projetista deve construir uma tabela de levantamento capaz de alimentar as etapas posteriores de cálculo de corrente, demanda, queda de tensão, proteção e infraestrutura. A interpretação espacial da planta, tratada no Capítulo 7, é essencial nesse processo, pois a posição física das cargas influencia trajetos, distâncias, setorização e localização dos quadros.

Este capítulo não tem como objetivo repetir a teoria de classificação das cargas, motores ou formas de onda, já apresentada no Capítulo 5. Em vez disso, esses conceitos serão utilizados como referência para organizar os dados práticos do levantamento. Assim, quando uma carga for identificada, essa classificação será empregada como critério de registro e encaminhamento para cálculos posteriores.

O objetivo deste capítulo consiste em capacitar o discente na elaboração de um inventário técnico de cargas estruturado e padronizado, o qual servirá de base para as etapas subsequentes de cálculo de demanda, definição de circuitos e dimensionamento. Busca-se, portanto, desenvolver uma metodologia de organização dos dados para que o projeto elétrico seja conduzido de forma rastreável, coerente e tecnicamente verificável.

! Importante

Importância do levantamento: O levantamento de cargas define a qualidade dos dados utilizados nas decisões posteriores do projeto. Erros nessa etapa podem comprometer o dimensionamento dos condutores, dispositivos de proteção, quadros, alimentadores e infraestrutura elétrica.

8.2 Desenvolvimento teórico

O levantamento de cargas deve ser conduzido de forma organizada, podendo ser dividido em três etapas: identificação, quantificação e organização técnica. A Figura 8.1 apresenta essa sequência de forma esquemática, destacando que os dados coletados em campo precisam ser convertidos em informações úteis para o projeto.

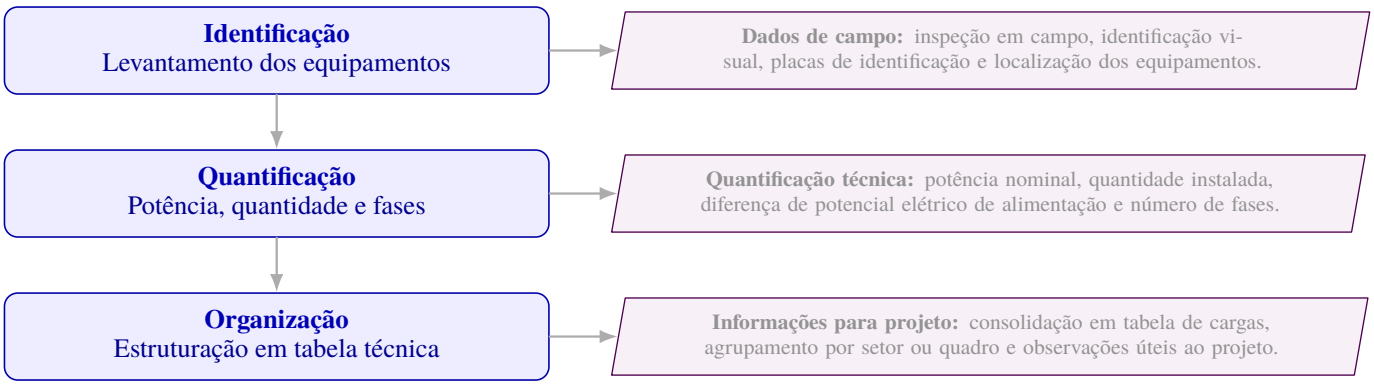

Figura 8.1: Etapas fundamentais do levantamento de cargas, desde a identificação dos equipamentos até a quantificação das potências e a organização técnica dos dados em formato adequado ao projeto elétrico.

Essas etapas podem ser interpretadas da seguinte forma:

- **Identificação**: reconhecimento dos equipamentos, pontos de utilização, ambientes atendidos, setores produtivos e finalidade de cada carga;
- **Quantificação**: registro das potências, quantidades, número de fases, fator de potência, rendimento, regime de operação e demais dados necessários ao projeto;
- **Organização**: estruturação dos dados em tabela técnica, com informações suficientes para cálculo, conferência, revisão e documentação.

A execução adequada dessas etapas evita que o projetista trabalhe com dados incompletos ou inconsistentes. Em projetos industriais, pequenas omissões podem gerar consequências relevantes, como subdimensionamento de alimentadores, reserva insuficiente em quadros, queda de tensão excessiva, incompatibilidade com dispositivos de proteção ou dificuldade de manutenção futura.

8.2.1 Identificação das cargas

A identificação das cargas consiste em reconhecer todos os pontos de consumo que deverão ser alimentados pela instalação elétrica. Essa etapa deve incluir cargas permanentes, cargas eventuais, equipamentos de reserva, circuitos de iluminação, tomadas de uso geral (TUG), tomadas de uso específico (TUE), motores, sistemas de climatização, equipamentos eletrônicos, painéis auxiliares e cargas futuras previstas no escopo do projeto.

Essa identificação deve ser feita a partir da planta baixa e de documentos complementares, como listas de equipamentos, fluxogramas de processo, layout de máquinas, memoriais descritivos, catálogos técnicos e informações fornecidas pelo cliente. Sempre que possível, cada carga deve receber um código único, de modo que possa ser rastreada entre planta, quadro de cargas, diagrama unifilar e memorial de cálculo.

Nota

Relação com a classificação das cargas: A classificação físico-elétrica das cargas foi estudada no Capítulo 5. No levantamento de cargas, essa classificação não precisa ser desenvolvida novamente; ela deve ser usada como campo de registro para indicar se a carga exige atenção especial quanto a fator de potência, corrente de partida, harmônicas, regime de operação ou dados de placa. Na maioria dos casos, o fator de potência $\cos\phi$ é um dos parâmetros decisivos para os cálculos posteriores.

A classificação, portanto, deve ser objetiva. Um motor pode ser registrado como carga motorizada; uma resistência elétrica, como carga de aquecimento; uma fonte chaveada, como carga eletrônica; e uma luminária, como carga de iluminação. A finalidade dessa informação não é explicar novamente o comportamento da carga, mas orientar quais dados devem ser coletados e quais critérios serão aplicados nas etapas seguintes.

8.2.2 Dados mínimos do levantamento

Para que o levantamento seja útil ao dimensionamento, a tabela de cargas deve conter mais do que a potência nominal. Devem ser registrados dados suficientes para permitir a determinação da corrente de projeto, a organização dos circuitos, a escolha da proteção, a previsão de demanda e a verificação de queda de tensão.

A Tabela 8.1 apresenta um conjunto de campos recomendados no levantamento. A tabela não substitui o modelo final adotado pelo projetista, mas indica quais informações devem ser procuradas durante a coleta de dados.

Tabela 8.1: Campos recomendados para o levantamento técnico de cargas

Campo	**Finalidade no levantamento**	**Observação técnica**
Identificação	Permitir rastreabilidade entre planta, tabela, diagrama unifilar e memorial.	“M1”, “QD1”, “C1”, “TUE1” ou outra identificação sistemática.
Setor ou ambiente	Relacionar a carga à sua posição física e função operacional.	Compatível com a setorização definida na planta. Prever escalabilidade.
Descrição da carga	Indicar o equipamento ou ponto de consumo atendido.	Suficiente para evitar ambiguidades durante execução e manutenção.
Quantidade	Registrar o número de unidades iguais ou semelhantes.	Equipamentos individuais, luminárias, tomadas ou pontos repetidos.
Potência nominal	Registrar a potência informada em placa, catálogo ou memorial.	Unidade original quando necessário, como [W], [hp], [VA] ou [BTU/h].
Diferença de potencial elétrico	Indicar a alimentação prevista, ou a capacidade do alimentador, para a carga.	Deve ser compatível com a rede disponível e com a placa do equipamento.
Número de fases	Diferenciar cargas monofásicas, bifásicas ou trifásicas.	As relações entre sistemas mono e trifásicos foram tratadas no Capítulo 3.
Fator de potência	Permitir estimativa da potência aparente S [VA] e da corrente.	Quando não houver dado confiável, deve-se justificar a premissa adotada.
Rendimento	Necessário para cargas eletromecânicas, especialmente motores.	A interpretação da placa de motores foi discutida no Capítulo 5.
Regime de operação	Indicar se a carga é contínua, intermitente, eventual, reserva ou crítica.	Esse dado influencia demanda, simultaneidade e critérios de reserva.
Distância aproximada	Apoiar a verificação de queda de tensão e definição de infraestrutura.	Trajeto real dos condutores, não apenas a distância em linha reta.
Fonte da informação	Placa, catálogo, planta, cliente ou premissa de projeto.	Facilita revisão, auditoria técnica e atualização futura.

A coleta desses campos permite que o levantamento seja usado como documento de trabalho, e não apenas como lista preliminar de equipamentos. Quanto mais clara for a origem dos dados, menor será o risco de inconsistências nas etapas seguintes, como cálculo de corrente, definição dos circuitos, dimensionamento dos condutores e seleção da proteção. Recomenda-se utilizar ferramentas digitais de tabulação, como Microsoft Excel, Google Sheets, LibreOffice Calc ou equivalentes, independentemente do uso posterior de softwares de desenho ou documentação elétrica, pois isso facilita a produção do memorial de cálculo. Assim, os campos da Tabela 8.1 auxiliam no gerenciamento das informações e facilitam a revisão, divulgação e apresentação da documentação final.

! Importante

Dados de placa e dados estimados: Sempre que possível, devem ser utilizados dados de placa, catálogos ou documentos de fabricante. Quando for necessário adotar valores estimados, a premissa deve ser registrada no levantamento ou no memorial de cálculo, permitindo revisão posterior.

8.2.3 Exemplo de levantamento de cargas

Considere uma residência com piscina utilizada como exemplo didático. Embora o foco da obra esteja em instalações industriais, esse exemplo simplificado permite visualizar com clareza a lógica de levantamento, organização espacial e registro das cargas em tabela. Nessa situação, admite-se uma edificação com ambientes de uso comum, como sala, cozinha e quarto, além de uma área externa com piscina. As cargas consideradas incluem pontos de iluminação, equipamentos eletrodomésticos, climatização e uma bomba de piscina, permitindo comparar cargas de baixa potência, cargas de uso específico e uma carga motriz dedicada.

A partir dessa descrição, os equipamentos são listados na Tabela 8.2, que apresenta os dados iniciais do exemplo, incluindo a finalidade de cada ambiente ou setor atendido. Neste ponto, não se pretende realizar o dimensionamento completo dos circuitos, mas apenas mostrar uma alternativa de como os dados devem ser organizados para posterior cálculo de corrente, definição de circuitos, avaliação de demanda e representação em diagramas.

Tabela 8.2: Tabela de levantamento de cargas, exemplo residencial de pequeno porte: sala, cozinha, dormitório e quintal com piscina

Carga	**Potência** [W]	$\cos\phi$	**Qtd.**	**Fases**	**Setor**	**Observação de uso**
Iluminação sala	300	1,00	1	1	Sala	Iluminação geral de ambiente de permanência. Refere ao conjunto de luminárias.
TV	150	0,95	1	1	Sala	Equipamento eletrônico de baixa potência. Pode ser abstraído como uma TUG.
Geladeira	500	0,85	1	2	Cozinha	Equipamento convencional com compressor e operação intermitente.
Micro-ondas	1200	1,00	1	2	Cozinha	Carga de uso específico, com operação temporária, cerca de 3 a 4 vezes por dia.
Ar-condicionado	1200	0,90	1	2	Quarto	Carga de climatização, com operação dependente do perfil de uso, podendo empregar tecnologia *inverter*.
Bomba piscina	1500	0,80	1	3	Piscina	Motor dedicado; dados devem ser confirmados em placa ou catálogo.

A inclusão da coluna de observação auxilia na interpretação técnica do levantamento. Em uma situação real, essa coluna deve contemplar a maior quantidade possível de dados sobre o perfil do usuário. Essas informações ajudam a compreender o regime provável de uso da carga, a criticidade do circuito e a necessidade de reserva ou flexibilidade. Por exemplo, a bomba da piscina possui função específica e pode ser tratada como carga dedicada, enquanto as cargas da sala podem estar associadas a uso simultâneo parcial e a menor criticidade operacional.

8.2.4 Potência instalada e organização das potências

Após a identificação e a organização inicial das cargas, torna-se possível calcular a potência instalada da instalação. A potência instalada corresponde à soma das potências nominais dos equipamentos considerados no levantamento, sem aplicação inicial de fatores de simultaneidade, demanda, utilização ou outros.

Matematicamente, pode-se escrever:

$$P = \sum_{k=1}^{n} P_k \tag{8.1}$$

onde:

- P é a potência instalada total, em watt [W];
- P_k é a potência nominal individual da carga k, em watt [W].

Aplicando a Equação 8.1 ao exemplo didático da Tabela 8.2, obtém-se:

$$P = 300 + 150 + 500 + 1200 + 1200 + 1500 = 4850\,[\text{W}]. \tag{8.2}$$

Definição

Potência instalada: Define-se potência instalada como a soma das potências nominais de todos os equipamentos previstos em uma instalação ou em uma parte dela. Esse valor representa a capacidade total instalada, mas não significa necessariamente que todas as cargas operarão simultaneamente.

Saiba Mais

Uso da potência instalada em decisões de projeto: A potência instalada não serve apenas para somar cargas em uma tabela. Embora ainda não considere simultaneidade, demanda ou regime real de operação, ela fornece uma primeira estimativa da dimensão elétrica da instalação e orienta decisões preliminares de projeto.
Em instalações residenciais, comerciais ou industriais, esse valor auxilia na definição do padrão de entrada, na avaliação da categoria de atendimento da unidade consumidora, na consulta às normas da concessionária e na estimativa inicial da infraestrutura necessária. Em instalações de maior porte, indica a necessidade de estudos sobre fornecimento em média tensão, transformador dedicado, localização de subestação, reserva técnica e expansão futura.
A potência instalada também influencia decisões econômicas e administrativas. Ela pode servir como referência preliminar para estimar complexidade do projeto, tempo de elaboração, quantidade de circuitos, volume de materiais, custo de montagem, necessidade de equipe especializada e possíveis encargos associados à aprovação, regularização ou contratação de energia. Em alguns contextos, também auxilia estimativas indiretas de tributos, taxas, licenciamento ou custos contratuais, embora esses valores dependam da legislação local, da concessionária e do tipo de empreendimento. No Brasil, essa análise deve considerar diferenças regionais importantes. Em áreas urbanas densas, pode haver maior disponibilidade de infraestrutura elétrica para atendimento em baixa tensão. Em zonas rurais, regiões afastadas ou áreas industriais em expansão, a distância até a rede, a capacidade disponível do alimentador e a necessidade de extensão ou reforço de rede podem tornar a potência instalada decisiva para a viabilidade técnica e econômica. Portanto, ela deve ser vista como uma grandeza inicial de planejamento: não substitui o cálculo de demanda, mas antecipa o porte da instalação e orienta as primeiras decisões de projeto.

A potência instalada é uma informação inicial importante, pois permite estimar a ordem de grandeza da instalação e serve de base para análises posteriores; entretanto, ela não deve ser confundida com potência demandada, corrente de projeto ou potência efetivamente solicitada da rede em condições reais de operação. Quando houver cargas com fator de potência diferente da unidade, normalmente menor que 1, a potência aparente deverá ser registrada, pois, embora alguns projetistas mantenham esse cálculo implícito, essa grandeza é efetivamente utilizada para estimar corrente, carregamento de transformadores, alimentadores e dispositivos de proteção.

A relação entre potência ativa P, potência reativa Q, potência aparente S e fator de potência cos ϕ foi apresentada no Capítulo 2. Neste capítulo, esses conceitos serão empregados apenas como campos de organização do levantamento, preparando os dados que serão utilizados posteriormente no dimensionamento elétrico da instalação.

Nota

Potência ativa e aparente: No levantamento de cargas, é recomendável registrar a potência ativa quando o equipamento for especificado em watt [W] ou quilowatt [kW], e a potência aparente quando o equipamento for especificado em volt-ampere [VA] ou quilovolt-ampere [kVA]. Quando for necessário converter uma grandeza em outra, devem ser utilizadas as relações de potência apresentadas no Capítulo 2, sempre registrando o fator de potência adotado.

No exemplo apresentado, a bomba da piscina possui potência ativa de $1500\,[\mathrm{W}]$ e fator de potência igual a $0{,}80$. Isso indica que sua potência aparente será maior que a potência ativa. Esse tipo de observação deve ser registrado no levantamento; o cálculo da corrente deve ser realizado conforme os critérios apresentados no Capítulo 4.

8.2.5 Fator de uso e potência demandada

Em uma instalação real, nem todas as cargas operam ao mesmo tempo nem permanecem continuamente em sua potência nominal. A iluminação pode permanecer ligada por longos períodos, enquanto equipamentos como micro-ondas, bombas, sistemas de climatização, tomadas de uso geral e máquinas de operação eventual podem funcionar intermitentemente. Por esse motivo, antes de calcular a corrente final de um alimentador, é necessário distinguir a **potência instalada** da potência que tende a ser efetivamente solicitada em condições reais de uso.

Neste capítulo, será utilizado o conceito introdutório de **fator de uso**, como abstração dos fatores do Capítulo 10, com a finalidade de mostrar que a potência instalada pode ser reduzida de acordo com o grau e modo de utilização das cargas. Uma forma simplificada de representar essa ideia é:

$$\mathrm{f} = \frac{D}{P}, \tag{8.3}$$

onde:

- f é o fator de simultaneidade, adimensional [1];
- D é a potência demandada, em watt [W];
- P é a potência instalada, em watt [W].

Usando a Equação 8.3 no exemplo didático da Tabela 8.2, a potência demandada pode ser expressa como: $D = \mathrm{f} \cdot P$, e se $\mathrm{f} = 0{,}6$, tem-se: $D = 0{,}6 \cdot 4850 = 2910\,[\mathrm{W}]$.

Definição

Potência demandada: Consumo energético por unidade de tempo previsto ou estimado para uma condição real de operação da instalação. Ela não corresponde necessariamente à soma direta de todas as cargas instaladas, pois depende do regime de uso, da simultaneidade, do perfil de ocupação, do tipo de processo e dos critérios adotados no projeto.

O valor $\mathrm{f} = 0{,}6$ utilizado no exemplo anterior é apenas didático. Em um projeto elétrico real, a redução da potência instalada deve ser definida com base na natureza da instalação, no comportamento das cargas, em critérios normativos, em dados operacionais, em orientações da concessionária ou em premissas justificadas pelo projetista.

É importante observar que qualquer "fator de uso" não deve ser aplicado mecanicamente. Em alguns casos, determinadas cargas podem operar simultaneamente por exigência do processo; em outros, o uso simultâneo é improvável. Em instalações industriais, essa estimativa deve considerar processo produtivo, turno de operação, sazonalidade, possibilidade de expansão futura, cargas críticas e equipamentos reserva.

Desambiguação

Fatores aplicados à potência instalada: O "fator de uso", f, pode abstrair o "fator de simultaneidade", com o intuito de aproximar a potência instalada da potência efetivamente considerada no projeto. Outros fatores também podem abstraidos isolademante ou em conjunto por f, como o "fator de demanda", o "fator de utilização" e o "fator de diversidade"; cada fator representa um aspecto diferente do uso das cargas. De forma simplificada, a simultaneidade está associada à coincidência de funcionamento; a utilização está associada ao carregamento real em relação à potência nominal; a demanda representa a potência prevista para determinada condição de operação; e a diversidade está relacionada à não coincidência dos máximos individuais.
A apresentação formal desses conceitos, com exemplos e critérios de aplicação, é desenvolvida no Capítulo 10.

Portanto, nesta etapa do projeto, o "fator de uso" deve ser entendido como uma ferramenta preliminar para estimar a potência solicitada por um conjunto de cargas. A aplicação correta exige identificar o grupo analisado, compreender seu regime de funcionamento e justificar tecnicamente o fator adotado, evitando tanto o superdimensionamento desnecessário quanto a subestimação da corrente de projeto.

8.2.6 Estrutura mínima da tabela de levantamento

O levantamento de cargas deve ser registrado em uma tabela técnica suficientemente completa para permitir rastreabilidade entre planta baixa, quadro de cargas, diagrama unifilar e memorial de cálculo. Essa tabela não deve conter apenas a potência dos equipamentos, mas também informações que influenciam diretamente o dimensionamento.

A Tabela 8.3 apresenta uma estrutura de levantamento mais completa do que a Tabela 8.2 para o exemplo didático adotado. A inclusão da categoria funcional não tem a finalidade de repetir a teoria das cargas, mas apenas orientar a consulta aos critérios já discutidos no Capítulo 5. A distância aproximada até o quadro auxilia nas etapas posteriores de verificação de queda de tensão e definição do trajeto dos condutores.

Tabela 8.3: Tabela de levantamento de cargas com dados técnicos mínimos para etapas posteriores

Carga	**Pot.** [W]	$\cos\phi$	**Fases**	**Qtd:**	**Setor**	**Categoria funcional**	**Dist. aprox.** [m]
Iluminação sala	300	1,00	1	1	Sala	Iluminação de ambiente interno.	8
TV	150	0,95	1	1	Sala	Equipamento eletrônico de baixa potência.	7
Geladeira	500	0,85	2	1	Cozinha	Motor compressor e operação intermitente.	6
Micro-ondas	1200	1,00	2	1	Cozinha	TUE com operação temporária.	5
Ar-condicionado	1200	0,90	2	1	Quarto	Motor *inverter* para climatização.	4
Bomba piscina	1500	0,80	3	1	Piscina	Motor de indução trifásico dedicado.	12

Os valores de distância apresentados na Tabela 8.3 possuem caráter didático. Em um projeto real, essas distâncias devem ser obtidas a partir da planta baixa, considerando o trajeto efetivo da infraestrutura e não apenas a distância em linha reta entre o quadro e a carga. Curvas, desvios, subidas, descidas, eletrocalhas, eletrodutos embutidos e passagens por *shafts* ou áreas técnicas podem aumentar significativamente o comprimento real dos condutores.

Os diversos fatores descritos não fazem parte de cálculos isolados. Eles representam hipóteses de projeto e, por isso, devem ser formalmente documentados. Em projetos profissionais, o registro dessas premissas no memorial de cálculo não é apenas uma boa prática, mas uma exigência associada à conformidade técnica do projeto, pois as normas aplicáveis requerem que os critérios adotados para dimensionamento, seleção e verificação dos componentes sejam justificáveis e rastreáveis. Dessa forma, o memorial de cálculo, em formato digital ou impresso, permite a conferência posterior, a revisão em caso de alteração de carga, mudança de layout ou ampliação da instalação, além de servir como documento técnico de apoio à responsabilidade profissional pelo projeto.

A Figura 8.2 sintetiza o encadeamento entre o levantamento de cargas e as etapas seguintes do projeto. O objetivo da figura é mostrar que os dados coletados inicialmente não permanecem isolados: eles alimentam o quadro de cargas, a estimativa de potência, a análise de demanda, o cálculo da corrente de projeto e, posteriormente, o dimensionamento de condutores e dispositivos de proteção.

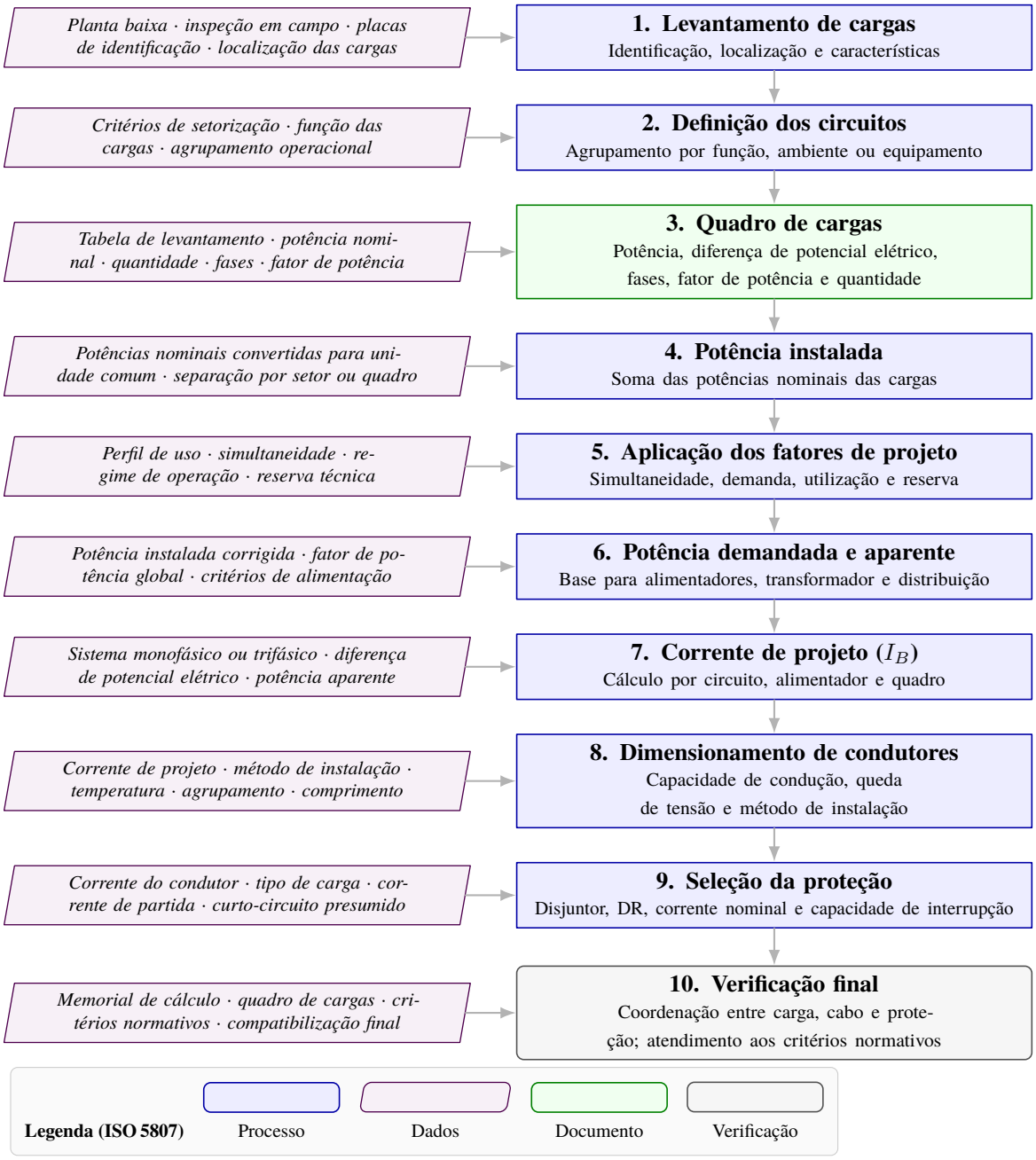

Figura 8.2: Encadeamento dos dados do levantamento de cargas até as etapas de definição dos circuitos, quadro de cargas, potência instalada, demanda, corrente de projeto, dimensionamento de condutores e seleção da proteção. O presente capítulo aborda o levantamento de informações para projeto e agrupamento estratégico do **Bloco 3**.

A organização adequada do levantamento também facilita revisões futuras. Quando uma carga é adicionada, removida ou substituída, a alteração pode ser rastreada na tabela, na planta, no quadro de cargas e no memorial de cálculo. Essa rastreabilidade evita inconsistências entre documentos e contribui para a segurança da instalação.

Em instalações industriais, esse procedimento torna-se ainda mais importante devido à presença de motores, máquinas dedicadas, cargas de processo, circuitos auxiliares, cargas reserva e equipamentos com regimes de operação diferentes. Assim, a tabela de levantamento deve ser entendida como um documento vivo durante o desenvolvimento do projeto, sendo refinada à medida que novas informações são incorporadas.

Saiba Mais

***Shafts* em instalações elétricas:** Em edificações, o termo *shaft* designa um espaço técnico vertical destinado à passagem organizada de instalações prediais, como eletrodutos, eletrocalhas, cabos elétricos, tubulações hidráulicas, sistemas de comunicação, ventilação ou outros serviços. Em geral, os *shafts* conectam diferentes pavimentos ou áreas técnicas, funcionando como corredores verticais de infraestrutura. O termo *shaft* é um anglicismo cuja tradução técnica pode ser *prumada*, *espaço técnico vertical*, *poço vertical*, *duto de serviços auxiliares*, *eixo vertical* ou *passagem vertical para tubulações, cabeamentos e eletrodutos*.
No projeto elétrico, os *shafts* são importantes porque influenciam diretamente o trajeto real dos condutores. Uma carga localizada próxima ao quadro em planta pode, na prática, exigir um percurso maior caso os cabos precisem subir, descer ou passar por um *shaft* específico antes de alcançar o ponto de utilização. Por isso, o comprimento dos condutores deve considerar o percurso efetivo da infraestrutura, e não apenas a distância horizontal entre quadro e carga.
Além disso, os *shafts* favorecem a organização, a inspeção e a manutenção das instalações, pois concentram passagens técnicas em locais previstos no projeto arquitetônico. Entretanto, também exigem cuidado quanto à acessibilidade, separação entre sistemas, ocupação disponível, proteção mecânica, ventilação, risco de propagação de incêndio e compatibilidade com normas técnicas. Em instalações industriais ou edifícios de maior porte, a escolha correta dos *shafts* pode reduzir interferências, facilitar futuras expansões e tornar a execução mais segura e organizada.

8.3 Resumo do capítulo

Neste capítulo, o levantamento de cargas foi apresentado como etapa inicial essencial do projeto elétrico, responsável por converter informações de campo (e.g.: planta baixa, catálogos, placas de identificação) em dados técnicos organizados. Esses dados fundamentam o cálculo de corrente, demanda, queda de diferença de potencial elétrico, definição de circuitos, dimensionamento de condutores, seleção da proteção e documentação técnica.

O procedimento foi estruturado em três etapas: identificação, quantificação e organização técnica. A identificação reconhece equipamentos, pontos de utilização, ambientes e finalidades das cargas; a quantificação registra potência, quantidade, número de fases, fator de potência, rendimento e regime de operação; e a organização dispõe essas informações em tabelas técnicas rastreáveis.

Destacou-se que a classificação físico-elétrica das cargas, os conceitos de motores e as formas de alimentação devem ser usados como critérios práticos de registro. Assim, cargas motorizadas, resistivas, eletrônicas, de iluminação ou de uso específico podem ser identificadas para antecipar cuidados com fator de potência, corrente de partida, harmônicas, regime de operação, circuito dedicado e dados de placa. O exemplo didático demonstrou como registrar cargas de diferentes naturezas, incluindo ambiente, finalidade, potência, quantidade, observações técnicas e origem dos dados adotados.

Também foram discutidos potência instalada, potência aparente, fator de potência, fator de simultaneidade e potência demandada. A potência instalada foi definida como a soma das potências nominais das cargas, sem aplicação inicial de fatores de demanda, simultaneidade ou utilização. Ressaltou-se, porém, que a demanda depende do perfil de uso, do regime de operação e das premissas adotadas.

O capítulo diferenciou fator de simultaneidade, fator de demanda, fator de utilização e fator de diversidade, enfatizando que esses fatores devem ser justificados conforme o agrupamento das cargas, o comportamento esperado da instalação, dados operacionais, critérios normativos ou premissas do memorial de cálculo.

Por fim, apresentou-se uma estrutura ampliada de levantamento na Tabela 8.3, incluindo categoria funcional e distância aproximada até o quadro. Ressaltou-se que essa distância deve considerar o trajeto real dos condutores, com curvas, desvios, subidas, descidas, eletrocalhas, eletrodutos, *shafts* e áreas técnicas. A Figura 8.2 sintetizou o encadeamento entre levantamento de cargas e etapas posteriores, evidenciando que um levantamento bem elaborado reduz incertezas, evita inconsistências e sustenta decisões rastreáveis.

Capítulo 9

Quadro de cargas

9.1 Introdução

O quadro de cargas constitui um dos principais documentos de síntese do projeto elétrico. Nele, as informações obtidas no levantamento de cargas, discutido no Capítulo 8, são reorganizadas por circuitos, fases, setores e critérios de alimentação. Sua finalidade não é apenas listar equipamentos, mas consolidar os dados necessários para a conferência técnica da instalação, para a distribuição dos circuitos e para as etapas posteriores de dimensionamento.

Diferentemente do levantamento de cargas, que registra os pontos de consumo individualmente, o quadro de cargas organiza esses pontos em circuitos elétricos. Assim, um conjunto de luminárias pode compor um circuito de iluminação, tomadas de uso geral (TUG) do mesmo ambiente podem formar um circuito terminal, e uma máquina de maior potência pode exigir circuito exclusivo (tomada de uso exclusivo, TUE). Essa passagem do inventário de cargas para a organização por circuitos é essencial para tornar o projeto executável, verificável e rastreável.

O quadro de cargas estabelece uma ponte entre a planta, o diagrama unifilar, o memorial de cálculo e a seleção dos dispositivos de proteção. A interpretação espacial das cargas foi abordada no Capítulo 7; o cálculo das correntes foi apresentado no Capítulo 4; e o comportamento de cargas industriais e motores foi discutido no Capítulo 5.

O objetivo deste capítulo consiste em apresentar critérios para agrupamento de circuitos, estruturação tabular do quadro de cargas, verificação preliminar do balanceamento entre fases e integração do quadro com as etapas seguintes do projeto. Busca-se, portanto, capacitar o discente a transformar o levantamento de cargas em um documento técnico claro, consistente e compatível com o restante da documentação elétrica.

! Importante

Função do quadro de cargas: O quadro de cargas não substitui o memorial de cálculo, o diagrama unifilar ou a planta elétrica. Sua função é consolidar as principais informações dos circuitos em formato tabular, permitindo conferência rápida de potência, fases, corrente de projeto, proteção, condutores, setorização e observações técnicas relevantes.

9.2 Desenvolvimento teórico

A elaboração do quadro de cargas deve seguir princípios de organização funcional, clareza técnica e rastreabilidade. Cada circuito deve possuir identificação própria, descrição objetiva, dados elétricos mínimos e correspondência com os demais documentos do projeto. Essa organização permite identificar inconsistências, revisar alterações, conferir balanceamento entre fases e orientar as etapas posteriores de dimensionamento.

Em um projeto bem documentado, o circuito indicado no quadro de cargas deve aparecer na planta elétrica, no diagrama unifilar e no memorial de cálculo com a mesma identificação. Essa coerência documental reduz ambiguidades durante a execução, facilita a inspeção e favorece futuras manutenções ou ampliações da instalação.

Definição

Quadro de cargas: Tabela técnica que organiza as cargas elétricas de uma instalação, de um quadro geral ou de um quadro secundário, relacionando circuitos, potências, diferenças de potencial elétrico, número de fases, correntes, fatores de potência e demais dados necessários ao dimensionamento. Sua função é servir como elo entre o levantamento de cargas, os cálculos elétricos, a seleção de condutores e dispositivos de proteção e a elaboração dos diagramas do projeto. Note que existe a possibilidade de ter um quadro de cargas cujas cargas sejam quadros de cargas aninhados.

9.2.1 Agrupamento funcional dos circuitos

Os circuitos devem ser agrupados conforme a função das cargas, como grupo gerador, refrigeração, iluminação ou força; sua localização, como dormitório, cozinha ou almoxarifado; e suas exigências operacionais, como operação permanente, intermitente ou esporádica. Esse agrupamento não deve ser confundido com a classificação físico-elétrica das cargas apresentada no Capítulo 5, na Tabela 5.1. Aqui, o objetivo é organizar os circuitos do quadro de modo que a instalação possa ser operada, protegida e mantida com segurança.

Entre os grupos funcionais mais comuns, destacam-se:

- **Circuitos de iluminação**: destinados a luminárias internas, externas, de circulação, emergência, entre outras;
- **Circuitos de TUG**: destinados a pontos de alimentação de uso não específico ou de baixa previsibilidade;
- **Circuitos de TUE**: destinados a equipamentos definidos, com potência, localização ou função conhecida;
- **Circuitos de força**: destinados a motores, máquinas, resistências ou equipamentos industriais;
- **Circuitos auxiliares**: destinados a comando, automação, sinalização, instrumentação, painéis auxiliares ou sistemas de controle. Aqui é possível considerar subcategorias para circuitos de vigilância, internet e comunicação.

A separação funcional dos circuitos facilita a manutenção e reduz interferências entre cargas de naturezas distintas. Motores, por exemplo, podem apresentar corrente de partida elevada, conforme discutido no Capítulo 5, e por isso frequentemente são alimentados por circuitos dedicados. Da mesma forma, circuitos eletrônicos sensíveis exigem tratamento separado para reduzir interferência, desligamentos indevidos ou dificuldades de diagnóstico.

Nota

Quadros de cargas em estrutura hierárquica: Em instalações de maior porte, especialmente industriais, é comum que um quadro de cargas não relacione apenas **circuitos terminais**, isto é, cargas finais como motores, conjuntos de luminárias, tomadas ou equipamentos, mas também outros quadros alimentados por ele. Por exemplo, o quadro de cargas de um QGBT pode apresentar como “cargas” os quadros secundários QS1, QS2 e QS3; em seguida, cada um desses quadros secundários possui seu próprio quadro de cargas, detalhando os circuitos e equipamentos atendidos. Essa organização forma uma *estrutura do tipo árvore*: o quadro geral é a raiz, os quadros secundários são ramos intermediários e as cargas finais são ramos terminais. Essa disposição facilita a setorização, a distribuição de potência, a análise de demanda, a coordenação da proteção, a manutenção e futuras expansões do sistema elétrico.

Definição

Circuito terminal: Define-se circuito terminal como a porção da instalação elétrica que parte de um quadro de distribuição e alimenta diretamente pontos de utilização, equipamentos ou cargas finais, sem passar por outro quadro intermediário. Por exemplo, um quadro alimentando luminárias pode ser tratado como um circuito terminal.

O agrupamento não deve ser feito apenas por conveniência gráfica. Deve considerar localização física, potência envolvida, regime de operação, criticidade da carga, facilidade de manutenção, possibilidade de expansão e coordenação com dispositivos de proteção. Em instalações industriais, essa decisão também pode considerar setores produtivos, linhas de processo, áreas técnicas e cargas que não devem ser desligadas simultaneamente.

Nota

Criticidade de carga: Indica o grau de importância operacional, técnica ou de segurança de uma carga. Uma carga é considerada mais crítica quando sua interrupção pode causar riscos às pessoas, parada de processos produtivos, perda de dados, danos a equipamentos, prejuízos econômicos relevantes ou comprometimento de sistemas essenciais.
Em uma instalação industrial, por exemplo, motores de processo, bombas de refrigeração, sistemas de exaustão, painéis de automação, iluminação de emergência, sistemas de segurança e equipamentos de controle podem apresentar criticidades diferentes. Uma tomada de uso geral em uma área administrativa tende a ter menor criticidade do que uma bomba responsável por manter um processo térmico sob controle.
A criticidade influencia decisões de projeto, como separação de circuitos, previsão de alimentação reserva, uso de nobreaks, geradores, redundância, seletividade da proteção, prioridade de manutenção e facilidade de acesso aos quadros. Por isso, durante o levantamento de cargas, é recomendável registrar observações sobre a função da carga e as consequências de sua interrupção. Essa informação ajuda o projetista a distinguir cargas comuns, cargas importantes, cargas críticas e cargas essenciais para a segurança ou continuidade operacional.

A Figura 9.1 ilustra a hierarquia de agrupamento de circuitos a partir de um quadro de distribuição, indicando categorias funcionais típicas que podem aparecer em instalações prediais e industriais.

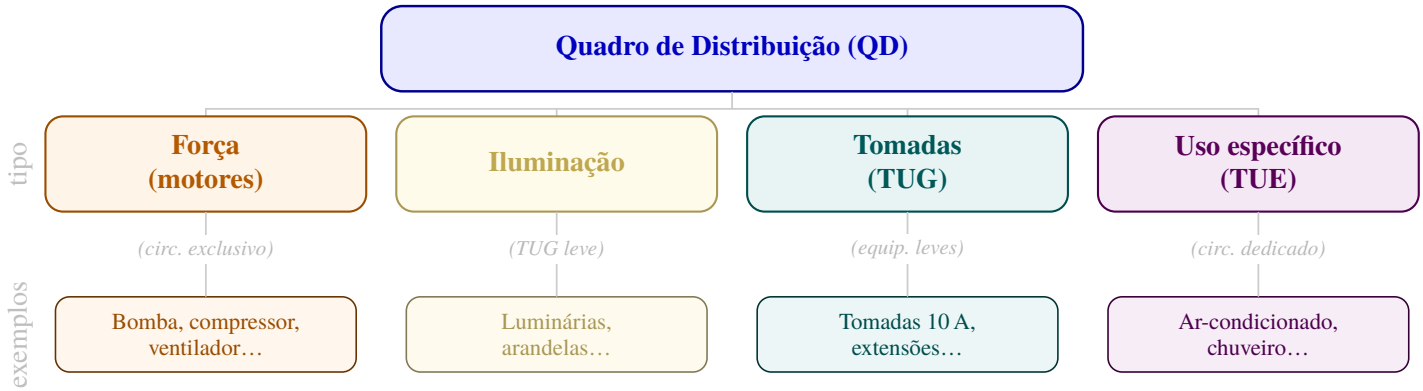

Figura 9.1: Hierarquia padrão de agrupamento de circuitos a partir do quadro de distribuição, conforme a natureza funcional e a localização das cargas. Esta hierarquia usa como exemplo quatro circuitos terminais.

9.2.2 Campos essenciais do quadro de cargas

A estrutura do quadro de cargas deve refletir os dados levantados no Capítulo 8, conforme mostra a Tabela 8.3, mas agora organizados por circuito. Cada linha do quadro deve representar um circuito ou grupo de cargas alimentado por um mesmo dispositivo de proteção, conforme o nível de detalhamento adotado no projeto.

A Tabela 9.1 apresenta campos recomendados para a estruturação de um quadro de cargas. Além dos circuitos terminais, a tabela também considera a possibilidade de um quadro geral possuir, como carga, um quadro secundário. Esse caso é comum em instalações organizadas de forma hierárquica, nas quais o QGBT alimenta quadros subordinados, e cada quadro subordinado possui seu próprio quadro de cargas detalhado.

A lista apresentada pode ser ampliada conforme a complexidade da instalação, incluindo, por exemplo, método de instalação, seção dos condutores, queda de tensão, corrente nominal do disjuntor, capacidade de interrupção, barramento de origem, identificação do quadro alimentado ou observações específicas de operação e manutenção.

Tabela 9.1: Campos recomendados para a estruturação do quadro de cargas.

Campo	Finalidade	Observação técnica	Exemplo em quadro geral
Circuito	Identificar cada ramificação do quadro.	Deve ser compatível com a planta, o diagrama unifilar e o memorial de cálculo.	AL-QS-01, alimentador do quadro secundário.
Descrição	Indicar a carga ou grupo de cargas.	A carga pode ser um equipamento final, um conjunto de pontos ou outro quadro de cargas.	QS-01 — quadro secundário da residência com piscina.
Quadro subordinado	Indicar quando a carga do quadro geral é outro quadro. Aninhamento.	Essa informação explicita a estrutura hierárquica do sistema elétrico, comum em instalações industriais. A nomenclatura utilizada deve ser sistemática.	QGBT→QS-A: QS-A→QS-A-01 e QS-A→QS-A-02.
Setor	Relacionar o circuito à área atendida.	Pode corresponder a ambiente, pavimento, processo, área técnica ou setor produtivo.	Área residencial, setor piscina, região em manutenção, etc.
Distância aproximada	Comprimento aproximado entre a carga e seu ponto de alimentação.	Representa o comprimento do trajeto dos condutores. Auxilia na estimativa de queda de diferença de potencial elétrico e na verificação posterior da seção dos condutores.	QS-01 localizado a (18 ± 3) [m] do QGBT, considerando curvas, desvios e percurso vertical.
Diferença de potencial elétrico	Indicar o tipo de fonte de alimentação.	Deve ser compatível com a rede disponível, com o quadro alimentado e com as cargas internas.	CA: $220/127$ [V], 50 [Hz]. CC: 12 [V], 60 [A].
Fases	Indicar a fase ou o conjunto de fases utilizado.	Auxilia no balanceamento de fases e na definição da alimentação aninhada. As conexões aqui definidas são respeitadas na montagem.	R, S, T, N e PE, para um QS que alimenta cargas monofásicas balanceadas.
Potência	Registrar a potência ativa ou aparente.	Quando a carga é outro quadro, pode-se usar a soma ou a demanda equivalente do quadro aninhado.	QS-01 com $P_{inst} = 4850$ [W], considerando todas as cargas.
Fator de potência	Registrar o valor utilizado para análise fasorial do circuito.	Obtido de placa, catálogo, cálculo equivalente ou premissa justificada. Em quadros subordinados, adota-se fator de potência global estimado.	$\cos\phi \approx 0{,}89$, se calculado a partir do conjunto de cargas internas do QS-01.
Corrente de projeto	Registrar a corrente adotada para dimensionamento.	Quando o circuito alimenta outro quadro, I_B corresponde à corrente do alimentador desse quadro como carga composta.	I_B do alimentador QS-01 depende de todas as cargas envolvidas.
Proteção	Indicar o dispositivo previsto para o circuito.	Em quadros subordinados ou aninhados, a proteção deve considerar seletividade criteriosamente.	Disjuntor do alimentador do QS-01 instalado no QGBT.
Observações	Registrar informações complementares relevantes.	Pode incluir carga dedicada, reserva, partida de motor, expansão futura, dado estimado ou existência de quadro subordinado.	O QS-01 detalha internamente circuitos de iluminação com previsão de expansão futura.

Nota

Corrente de projeto no quadro de cargas: A corrente de projeto, I_B, aparece no quadro de cargas para fins de organização e conferência. O cálculo de corrente em circuitos monofásicos e trifásicos foi apresentado no Capítulo 4. Aqui, considera-se que os valores de I_B foram calculados previamente ou serão calculados no memorial correspondente. O cálculo de I_B depende do "fator de uso" para inferência da demanda, conforme discutido no Capítulo 8.

9.2.3 Estrutura tabular do quadro de cargas

O quadro de cargas deve refletir diretamente o levantamento apresentado no capítulo anterior. Cada carga ou conjunto de cargas é organizado em circuitos, com suas respectivas características elétricas e indicação da fase ou das fases de alimentação. Essa estrutura permite verificar se a distribuição entre fases está coerente e se os dados de corrente, potência e proteção estão compatíveis com o restante do projeto.

Considerando o exemplo residencial, adotado como estudo de caso didático no Capítulo 8, primeiramente na Tabela 8.2 e, em sequência, na Tabela 8.3, a Tabela 9.2 apresenta uma versão refatorada. Os valores de corrente de projeto são apresentados apenas como dados tabulados, calculados conforme os critérios já estudados no Capítulo 4.

Tabela 9.2: Quadro de cargas — exemplo residencial com quadros de carga separados por função e por ambiente.

k	**Descrição**	V [V]	Δl [m]	P [W]	$\cos\phi$	**Fases**	I_B [A]	**Observação**
01	Iluminação sala	127	8 ±3	300	1,00	**RN**	2,36	Conjunto de luminárias.
02	Tomadas sala	127	7 ±2	150	0,95	**SN**	1,24	Equipamentos de porte pequeno.
03	Cozinha	220	6 ±2	1700	0,96	**TR**	8,08	Geladeira e micro-ondas.
04	Ar-condicionado	220	4 ±1	1200	0,90	**ST**	6,06	Carga dedicada.
05	Bomba piscina	220	12 ±5	1500	0,80	**RST**	4,92	Motor trifásico.

Nota: Para o circuito da cozinha, adotou-se *fator de potência composto* ponderado pela potência ativa das cargas (não é o método mais rigoroso, porém, neste caso é aplicado visando uma comparação como método correto). A distância Δl é o comprimento aproximado do trajeto entre o quadro alimentador e a carga; a relação acarga-alimentador é conforme o aninhamento da instalação.

Desambiguação

Tensões trifásicas: No Brasil, não se deve associar rigidamente uma tensão trifásica a uma única região geográfica. Em termos gerais, redes $220/127$ [V] são comuns em muitas áreas do Sul, Sudeste e Centro-Oeste, enquanto redes $380/220$ [V] aparecem em partes do Norte, Nordeste, Distrito Federal, algumas áreas litorâneas e instalações industriais com transformação própria. Essa distribuição varia conforme município, concessionária e padrão de atendimento.
A notação é lida como **tensão de linha/tensão de fase** (RMS): em $220/127$ [V], tem-se aproximadamente 220 [V] entre fases e 127 [V] entre fase e neutro; em $380/220$ [V], tem-se aproximadamente 380 [V] entre fases e 220 [V] entre fase e neutro. A expressão "$220/110$ [V]" ainda aparece em linguagem informal, mas tecnicamente costuma corresponder ao padrão nominal $220/127$ [V] ou a sistemas antigos. O projetista deve sempre confirmar a tensão disponível na norma da concessionária local, no contrato de fornecimento ou na medição do ponto de entrega.

Nota

Fator de potência ponderado: Quando um mesmo circuito alimenta cargas com fatores de potência diferentes, pode-se adotar, em uma análise preliminar, um fator de potência equivalente ponderado pela potência ativa de cada carga. É importante destacar que esta abordagem assume uma aproximação tolerável apenas quando todos os fatores de potência são semelhantes; esta aproximação assume que as grandezas de potência são de natureza escalar e não vetorial. A ideia é semelhante ao cálculo de um centro de carga, como apresentado na Seção 7.2.2: cada elemento contribui para o resultado final de acordo com seu "peso". Nesse caso, o peso adotado é a potência da carga. Assim, de forma geral:

$$\cos\phi_{eq} = \frac{\sum_{k=1}^{n} (P_k \cdot \cos\phi_k)}{\sum_{k=1}^{n} P_k}, \tag{9.1}$$

onde P_k é a potência ativa da carga k e $\cos\phi_k$ é seu fator de potência individual.

No circuito da cozinha da Tabela 9.2, considerando uma geladeira de 500 [W] com $\cos\phi = 0{,}85$ e um micro-ondas de 1200 [W] com $\cos\phi = 1{,}00$, obtém-se:

$$\cos\phi_{eq} = \frac{500 \cdot 0{,}85 + 1200 \cdot 1{,}00}{500 + 1200} = \frac{1625}{1700} \approx 0{,}96.$$

Assim, para alimentação bifásica, adotando uma fonte trifásica $220/380$ [V] em configuração estrela (⅄), a corrente de projeto pode ser estimada, de acordo com a nomenclatura da Seção 6.3.3, por:

$$I_B = \frac{1700}{220 \cdot 0{,}956} \approx 8{,}08\,[\text{A}].$$

O procedimento da Equação 9.1 é útil para organização preliminar do quadro de cargas, especialmente quando o circuito agrupa equipamentos distintos. Contudo, análises rigorosas, em instalações industriais, **é necessário calcular separadamente as parcelas ativa e reativa das cargas para obter a potência aparente equivalente**.

Observa-se que o **Circuito 05** da Tabela 9.2, destinado à bomba da piscina, é trifásico e, portanto, contribui de forma equilibrada para as três fases. Os demais circuitos são monofásicos ou bifásicos e devem ser distribuídos de modo a reduzir o desequilíbrio entre as fases **R**, **S** e **T**. Essa análise será realizada na Subseção 9.2.4.

Importante

Potência aparente equivalente: Em uma análise mais rigorosa, especialmente em instalações industriais, o fator de potência equivalente de um conjunto de cargas não é aproximado pela média ponderada dos fatores de potência. O procedimento mais consistente é calcular separadamente a potência ativa e a potência reativa de cada carga, somar essas parcelas e, em seguida, obter a potência aparente equivalente do conjunto. Para cada carga, pode-se escrever:

$$S_k = \frac{P_k}{\cos\phi_k} \quad \text{e} \quad Q_k = P_k \tan\phi_k \quad \text{onde:} \quad \phi_k = \cos^{-1}(\cos\phi_k) \tag{9.2}$$

Assim, para um conjunto de **N** cargas:

$$\textit{Parcela ativa} \rightarrow P_{eq} = \sum_{k=1}^{n} P_k, \qquad \textit{Parcela reativa} \rightarrow Q_{eq} = \sum_{k=1}^{n} Q_k, \tag{9.3}$$

e a potência aparente equivalente, com fator de potência equivalente do conjunto, passam a ser, respectivamente:

$$S_{eq} = \sqrt{P_{eq}^2 + Q_{eq}^2} \quad \text{e} \quad \cos\phi_{eq} = \frac{P_{eq}}{S_{eq}}.$$

Considerando novamente o circuito da cozinha da Tabela 9.2, tem-se uma geladeira de 500 [W] com $\cos\phi = 0{,}85$ e um micro-ondas de 1200 [W] com $\cos\phi = 1{,}00$. Para a geladeira:

$$\phi_{gel} = \cos^{-1}(0{,}85), \qquad Q_{gel} = 500 \cdot \tan\phi_{gel} \approx 310\,[\text{VAr}].$$

Para o micro-ondas, adotando $\cos\phi = 1{,}00$ como uma carga puramente resistiva, tem-se:

$$Q_{micro} = 0\,[\text{VAr}].$$

Logo:

$$P_{eq} = 500 + 1200 = 1700\,[\text{W}], \qquad Q_{eq} = 310 + 0 = 310\,[\text{VAr}],$$

e:

$$S_{eq} = \sqrt{1700^2 + 310^2} \approx 1728\,[\text{VA}].$$

Portanto, o fator de potência equivalente rigoroso é:

$$\cos\phi_{eq} = \frac{1700}{1728} \approx 0{,}98.$$

Para alimentação bifásica em 220 [V], a corrente de projeto resulta em:

$$I_B = \frac{S_{eq}}{V} = \frac{1728}{220} \approx 7{,}85\,[\text{A}].$$

Comparando com o método ponderado simplificado da Equação 9.1, no qual foi obtido $\cos\phi_{eq} \approx 0{,}96$ e $I_B \approx 8{,}08$ [A], observa-se que o cálculo por parcelas ativa e reativa, das Equações 9.2 e 9.3, fornece corrente ligeiramente menor do que a aproximação pelo fator de potência ponderado:

$$8{,}08 - 7{,}85 = 0{,}23\,[\text{A}].$$

Neste exemplo, a diferença é pequena, mas **o método por potência ativa e reativa é matemáticamente o adequado quando existem muitas cargas indutivas, motores, transformadores, inversores, fontes eletrônicas ou cargas com fatores de potência muito distintos**. Isso ocorre porque o fator de potência está associado a um ângulo elétrico, e a soma correta das cargas deve respeitar a composição vetorial entre potência ativa, reativa e aparente.

Aviso

Coerência entre documentos: O quadro de cargas deve ser compatível com a planta elétrica, o diagrama unifilar, o diagrama multifilar e o memorial de cálculo. Qualquer alteração em circuito, potência, fase, proteção ou condutor deve ser refletida nos demais documentos, evitando inconsistências durante execução, inspeção e manutenção.

O diagrama multifilar correspondente ao quadro apresentado na Tabela 9.2 é mostrado na Figura 9.2 a seguir.

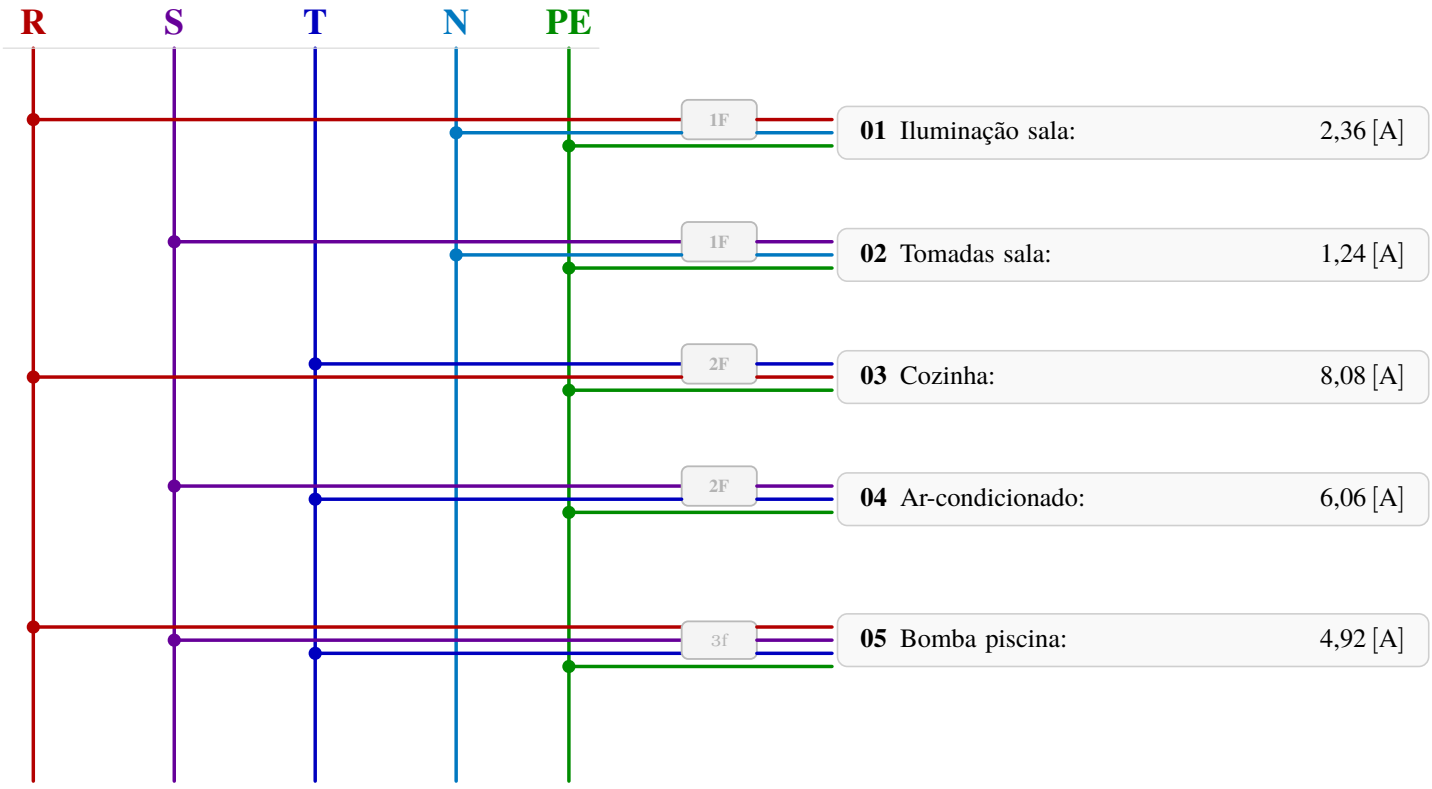

Figura 9.2: Diagrama multifilar simplificado do quadro de cargas do exemplo residencial, com os circuitos distribuídos entre as fases **R**, **S** e **T**.

9.2.4 Balanceamento de fases

Em sistemas trifásicos com cargas monofásicas e bifásicas, o quadro de cargas permite verificar a distribuição das correntes entre as fases. O objetivo do balanceamento é evitar que uma fase fique significativamente mais carregada que as demais, reduzindo assimetrias operacionais e melhorando o aproveitamento do sistema. Os fundamentos de sistemas trifásicos, grandezas de linha e fase e desequilíbrio foram discutidos no Capítulo 3.

Uma forma simples de avaliar o desequilíbrio é observar a diferença entre a maior e a menor corrente de fase:

$$\Delta I = I_{\max} - I_{\min} \tag{9.4}$$

onde:

- ΔI é a diferença entre as correntes extremas de fase, em ampere [A];
- $I_{\max}$ é a maior corrente entre as fases, em ampere [A];
- $I_{\min}$ é a menor corrente entre as fases, em ampere [A].

Esse indicador não substitui uma análise completa de qualidade de energia ou de desequilíbrio de tensão, mas é útil para a conferência inicial do quadro de cargas. Projetos mais rigorosos adotam critérios percentuais, medições em campo, ferramentas computacionais ou exigências específicas da concessionária ou do contratante.

Definição

Balanceamento de fases: Distribuição das cargas mono e bifásicas entre as fases de um sistema trifásico, buscando aproximar as correntes de linha e reduzir assimetrias operacionais no quadro de distribuição.

Aplicando esse critério ao exemplo da Tabela 9.2, verifica-se que os **Circuitos 01** e **03** estão conectados à fase **R**, os **Circuitos 02** e **04** à fase **S**, e os **Circuitos 03** e **04** à fase **T**. Note que o **Circuito 05** é trifásico e contribui igualmente para as três fases; por isso, ele não altera a diferença relativa entre as correntes monofásicas, embora aumente o valor total conduzido por cada fase. Assim, considerando as correntes totais por fase, tem-se inicialmente:

- $I_{\mathbf{R}} = \underbrace{2{,}36}_{\mathbf{01}} + \underbrace{8{,}08}_{\mathbf{03}} + \underbrace{4{,}92}_{\mathbf{05}} = 15{,}36\,[\mathrm{A}]$, quando os circuitos **01**, **03** e **05** estão ligados;
- $I_{\mathbf{S}} = \underbrace{1{,}24}_{\mathbf{02}} + \underbrace{6{,}06}_{\mathbf{04}} + \underbrace{4{,}92}_{\mathbf{05}} = 12{,}22\,[\mathrm{A}]$, com $I_{\min} \coloneqq I_{\mathbf{S}}$, quando os circuitos **02**, **04** e **05** estão ligados;
- $I_{\mathbf{T}} = \underbrace{8{,}08}_{\mathbf{03}} + \underbrace{6{,}06}_{\mathbf{04}} + \underbrace{4{,}92}_{\mathbf{05}} = 19{,}06\,[\mathrm{A}]$, com $I_{\max} \coloneqq I_{\mathbf{T}}$, quando os circuitos **03**, **04** e **05** estão ligados.

Logo, a diferença entre a maior e a menor corrente, $I_{\max}$ e $I_{\min}$ respectivamente, é:

$$\Delta I = 19{,}06 - 12{,}22 = 6{,}84\,[\mathrm{A}].$$

Esse resultado indica que a fase **S** está menos carregada que as demais, enquanto a fase **T** apresenta a maior corrente total. Uma primeira tentativa de melhoria consiste em redistribuir circuitos monofásicos no quadro. Entretanto, quando existem poucos circuitos e cargas de potências muito diferentes, **o balanceamento perfeito pode não ser possível sem subdividir circuitos, rever agrupamentos ou reorganizar cargas no levantamento**.

Saiba Mais

Ferramentas computacionais: Em quadros com muitos circuitos, o balanceamento de fases passar a ser um problema de organização computacional. Nesse caso, utiliza-se uma planilha eletrônica ou ferramenta semelhante para testar diferentes distribuições dos circuitos entre as fases e comparar os resultados obtidos.
Uma forma prática consiste em criar uma tabela na qual cada circuito possui corrente de projeto $I_{B,k}$, tipo de ligação e fases possíveis. Para cada fase, calcula-se a corrente total como a soma das contribuições dos circuitos aninhados:

$$I_{\mathbf{R}} = \sum I_{B,k,\mathbf{R}}, \qquad I_{\mathbf{S}} = \sum I_{B,k,\mathbf{S}}, \qquad I_{\mathbf{T}} = \sum I_{B,k,\mathbf{T}}, \tag{9.5}$$

onde $I_{B,k,\mathbf{R}}$, $I_{B,k,\mathbf{S}}$ e $I_{B,k,\mathbf{T}}$ representam a parcela da corrente do circuito k associada às fases **R**, **S** e **T**.
Em uma análise preliminar, circuitos monofásicos são atribuídos a uma única fase, circuitos bifásicos contribuem para o par de fases utilizado e circuitos trifásicos equilibrados contribuem igualmente para as três fases. Assim, a ferramenta computacional pode testar combinações como **R**, **S**, **T**, **RS**, **ST** ou **TR**, respeitando as restrições reais do projeto.
O objetivo pode ser minimizar a diferença entre a maior e a menor corrente de fase: $\min\left(I_{\max} - I_{\min}\right)$.
Em uma planilha, esse processo pode ser feito com funções condicionais e ferramentas de otimização. O projetista define as células que representam a fase de cada circuito e aquelas que calculam $I_{\mathbf{R}}$, $I_{\mathbf{S}}$ e $I_{\mathbf{T}}$; em seguida, a ferramenta procura uma combinação que reduza ΔI, respeitando restrições como circuitos dedicados, cargas trifásicas, cargas que não devem ser agrupadas e reserva de expansão.
Em projetos industriais mais rigorosos, pode ser necessário trabalhar com grandezas fasoriais, especialmente quando há fatores de potência distintos, cargas bifásicas, motores ou eletrônica de potência. Nesses casos, a análise pode considerar potência ativa, reativa e aparente por fase, em vez de apenas somar correntes escalares. O princípio, porém, permanece o mesmo: distribuir os circuitos para obter carregamentos próximos entre as fases, sem perder coerência com a planta, o quadro de cargas, os diagramas e o memorial de cálculo.
Assim, ferramentas computacionais não substituem o critério técnico do projetista. Elas auxiliam na comparação de alternativas, reduzem erros aritméticos e fortalecem a justificativa das escolhas, mas a decisão final deve considerar também manutenção, setorização, criticidade das cargas, facilidade de operação, reserva futura e coerência documental.

Nota

Limite prático do balanceamento: O balanceamento de fases depende da quantidade de circuitos disponíveis para redistribuição. Quando uma única carga monofásica possui corrente muito superior às demais, pode ser impossível obter equilíbrio satisfatório apenas trocando circuitos de fase. Nesses casos, pode ser necessário revisar o agrupamento das cargas, dividir circuitos ou prever alimentação trifásica para equipamentos compatíveis.

O balanceamento também contribui para a organização da proteção e para a continuidade de serviço. Circuitos bem distribuídos facilitam a identificação de falhas e melhoram a previsibilidade operacional do quadro. Os critérios de proteção, seletividade e coordenação entre dispositivos foram discutidos no Capítulo 6.

Importante

Conferência do quadro: Após distribuir os circuitos entre as fases, o projetista deve conferir se há concentração excessiva de cargas em uma fase, se os circuitos dedicados, como TUE e cargas específicas normalmente de maior porte, estão claramente identificados, e se os dispositivos de proteção previstos são compatíveis com as correntes registradas. Essa conferência deve ser repetida sempre que houver alteração no levantamento de cargas.

9.2.5 Rastreabilidade e revisão do quadro

Desambiguação

Cargas e alimentação: A expressão **quadro de cargas** deve ser usada, preferencialmente, para se referir a um **documento técnico em forma de tabela**. Esse documento organiza circuitos, cargas, potências, correntes, fases, fatores de potência, dispositivos de proteção e observações de projeto. Nesse sentido, alternativas adequadas são: *tabela de cargas*, *planilha de cargas*, *quadro tabular de cargas* ou *relação de circuitos e cargas*.
Já a expressão **quadro de alimentação** costuma se referir ao **componente físico** da instalação elétrica, isto é, uma caixa, painel ou conjunto destinado a receber alimentação elétrica e abrigar dispositivos de manobra, proteção, seccionamento, medição ou distribuição. Dependendo do caso, podem ser usados termos como *quadro elétrico*, *quadro de distribuição*, *quadro geral*, *quadro secundário*, *painel elétrico*, *centro de distribuição* ou *conjunto de manobra e proteção*.

A ambiguidade ocorre porque o termo *quadro* pode designar tanto um documento técnico quanto um equipamento físico. Assim, em um projeto, pode-se afirmar que o **quadro de cargas do QS-0X** é a tabela que descreve os circuitos alimentados pelo **quadro de distribuição QS-0X**. É importante notar que, embora sejam conceitos distintos, eles são interdependentes, visto que qualquer alteração física no equipamento deve ser refletida na atualização do documento, e vice-versa. Para evitar confusão, recomenda-se usar *quadro de cargas* quando o assunto for a tabela de projeto e *quadro elétrico*, *quadro de distribuição* ou *painel de alimentação* quando o assunto for o equipamento instalado.

O quadro de cargas deve ser tratado como documento de projeto sujeito a revisão. Durante o desenvolvimento da instalação, é comum que cargas sejam adicionadas, removidas, substituídas ou deslocadas. Cada alteração deve ser registrada de modo que a planta, o quadro de cargas, os diagramas e o memorial permaneçam coerentes entre si.

A rastreabilidade pode ser favorecida por práticas simples, como utilizar códigos únicos para circuitos e cargas, mantendo a mesma nomenclatura na planta, no quadro e no diagrama unifilar; registrar a origem dos dados de potência, fator de potência e corrente; atualizar o quadro sempre que houver alterações; indicar circuitos reserva ou espaços disponíveis; e revisar o balanceamento sempre que ocorrer redistribuição de circuitos.

Essas práticas são especialmente importantes em instalações industriais, nas quais o quadro pode atender máquinas, motores, sistemas auxiliares, iluminação, tomadas, automação e cargas futuras. Sem rastreabilidade, uma alteração aparentemente simples pode gerar inconsistências em diversos documentos do projeto.

9.2.6 Relação com demanda e dimensionamento

O quadro de cargas permite consolidar a potência instalada por circuito, por setor ou por quadro. Essa informação serve de ponto de partida para o cálculo da demanda, que será desenvolvido no Capítulo 10.

Assim, o quadro de cargas não deve ser interpretado como resultado final do dimensionamento. Ele é uma base intermediária: recebe dados do levantamento, registra correntes calculadas conforme o Capítulo 4, permite verificar o balanceamento de fases conforme os fundamentos do Capítulo 3 e fornece informações para a escolha de condutores e proteção, conforme os critérios discutidos no Capítulo 6.

Nota

Quadro de cargas e demanda: A potência instalada registrada no quadro de cargas representa a soma das cargas previstas, mas não corresponde necessariamente à potência efetivamente solicitada da rede. A demanda depende do perfil de uso, da simultaneidade, dos fatores aplicáveis, do processo produtivo e das premissas adotadas no projeto.

Em projetos urbanos ou prediais de grande porte, e especialmente em instalações industriais, essa relação *carga-demanda* assume importância estratégica. Um quadro de distribuição pode atender a diversas cargas instaladas, embora nem todas operem simultaneamente em regime nominal. Em contrapartida, processos que exigem a operação coordenada de múltiplas máquinas elevam a demanda efetiva do sistema. Por esse motivo, pela mutabilidade do problema, o quadro de cargas deve registrar dados técnicos suficientes para fundamentar o cálculo de demanda com critérios justificáveis. Devido a essa natureza dinâmica, o gerenciamento de quadros de cargas é significativamente menos trabalhoso quando realizado por meio de ferramentas computacionais em comparação a métodos manuais, uma vez que estas simplificam a atualização, a rastreabilidade e a manutenção da integridade das informações.

9.2.7 Reserva de capacidade

Além dos circuitos utilizados, o quadro de cargas deve prever possibilidade de ampliação futura, quando isso fizer parte das premissas do projeto. Essa reserva envolve espaço físico para novos dispositivos, capacidade nos barramentos, previsão de circuitos reserva, folga na infraestrutura e margem para crescimento de carga.

A Tabela 9.3 mostra uma modificação da Tabela 9.2, agora com a inclusão do **Circuito 06**, identificado como *Reservado*. Trata-se de um circuito bifásico de $800\,[\mathrm{W}]$, potência suficiente para sustentar uma pequena sala ou anexo, conectado entre as fases **R** e **S**, previsto para atender uma futura expansão da instalação. Note que a adoção dessas fases não é arbitrária: no exemplo anterior, as fases **R** e **S** eram justamente as menos carregadas em relação à fase **T**, o que torna tecnicamente coerente utilizar essa combinação para a reserva.

Tabela 9.3: Quadro de cargas – exemplo residencial prevendo reserva de capacidade.

$T_{\mathrm{amb}}\,[^{\circ}\mathrm{C}]$	**PVC**	**EPR/XLPE**	**Observação**
10	1,22	1,15	Condição mais favorável; assume-se linhas não subterrâneas.
20	1,12	1,08	Melhor dissipação térmica do que a referência.
30	1,00	1,00	Condição de referência didática para linhas não subterrâneas.
35	0,94	0,96	Valor utilizado no exemplo da bomba da piscina.
40	0,87	0,91	Temperatura ambiente elevada; a capacidade de condução deve ser reduzida.
45	0,79	0,87	Condição desfavorável, comum em locais próximos a fontes térmicas.
50	0,71	0,82	Exige atenção especial à escolha da seção e ao tipo de isolamento do cabo.

Nota: Os valores são apresentados com finalidade didática. Em projeto executivo, deve-se consultar a tabela normativa correspondente ao tipo de isolamento, ao método de instalação e à temperatura real do ambiente.

Nota

Esquema TN-S nos exemplos didáticos: Nos exemplos didáticos desta obra, será adotado como referência o esquema de aterramento TN-S, no qual o condutor neutro **N** e o condutor de proteção **PE** permanecem separados ao longo da instalação. Esse arranjo é geralmente recomendado para instalações novas e pode ser exigido conforme norma aplicável, projeto ou critério da concessionária, pois favorece a segurança, a organização dos circuitos e a correta atuação dos dispositivos de proteção. Contudo, a lógica de dimensionamento permanece válida para outros esquemas de aterramento, como TN-C, TN-C-S ou TT, desde que as características de cada esquema sejam consideradas.

Com a inclusão do circuito reserva, a corrente adicional de aproximadamente $3{,}64\,[\mathrm{A}]$ contribui simultaneamente para as fases **R** e **S**. Assim, considerando as correntes totais por fase após a inclusão do circuito reserva, tem-se:

- $I_{\mathbf{R}} = \underbrace{2{,}36}_{\mathbf{01}} + \underbrace{7{,}85}_{\mathbf{03}} + \underbrace{4{,}92}_{\mathbf{05}} + \underbrace{3{,}64}_{\mathbf{06}} = 18{,}77\,[\mathrm{A}]$, quando os circuitos **01**, **03**, **05** e **06** estão ligados;
- $I_{\mathbf{S}} = \underbrace{1{,}24}_{\mathbf{02}} + \underbrace{6{,}06}_{\mathbf{04}} + \underbrace{4{,}92}_{\mathbf{05}} + \underbrace{3{,}64}_{\mathbf{06}} = 15{,}86\,[\mathrm{A}]$, com $I_{\min} \coloneqq I_{\mathbf{S}}$, quando os circuitos **02**, **04**, **05** e **06** estão ligados;
- $I_{\mathbf{T}} = \underbrace{7{,}85}_{\mathbf{03}} + \underbrace{6{,}06}_{\mathbf{04}} + \underbrace{4{,}92}_{\mathbf{05}} = 18{,}83\,[\mathrm{A}]$, com $I_{\max} \coloneqq I_{\mathbf{T}}$, quando os circuitos **03**, **04** e **05** estão ligados.

Logo, a diferença atualizada entre a maior e a menor corrente, $I_{\max}$ e $I_{\min}$ respectivamente, é:

$$\Delta I = 18{,}83 - 15{,}86 = 2{,}97\,[\mathrm{A}].$$

Observa-se, portanto, que a reserva foi posicionada de forma estratégica: além de prever crescimento futuro, ela tende a aproveitar melhor as fases menos carregadas do exemplo. Em outras palavras, a reserva de capacidade também pode ser usada como instrumento preliminar de organização do balanceamento de fases, evitando concentrar expansões justamente na fase já mais solicitada.

A reserva de capacidade deve ser compatível com a finalidade da instalação. Em uma residência, a ampliação pode envolver novos circuitos de tomadas, climatização ou equipamentos específicos. Em uma indústria, pode envolver novas máquinas, painéis auxiliares, motores, sistemas de automação ou expansão de linhas produtivas. A definição dessa reserva deve ser registrada como premissa de projeto.

Importante

Reserva no quadro: A previsão de reserva deve considerar tanto o espaço físico quanto a capacidade elétrica do quadro. Não basta haver espaço para instalar novos disjuntores; também é necessário verificar barramentos, alimentadores, proteção geral, infraestrutura disponível e capacidade de atendimento da instalação.
Em instalações industriais, essa reserva é especialmente importante porque ampliações e ajustes operacionais são frequentes. Podem surgir novos motores, tomadas industriais, sensores, pequenos painéis de automação, pontos de videovigilância, equipamentos de rede, enlaces de internet industrial, fontes auxiliares, sistemas de supervisão e circuitos dedicados a instrumentação. Por isso, além dos módulos livres no quadro, recomenda-se prever folga em eletrodutos, eletrocalhas, bornes, barramentos, identificação de circuitos e capacidade térmica do conjunto.
A reserva deve ser registrada no quadro de cargas e no memorial de cálculo, distinguindo circuitos efetivamente instalados, circuitos previstos para expansão e espaços apenas disponíveis. Dessa forma, futuras intervenções podem ser realizadas com menor risco de improvisação, sobrecarga, perda de seletividade ou inconsistência entre planta, diagrama e instalação executada.

A ausência de reserva pode obrigar à substituição prematura de quadros, alimentadores ou infraestrutura. Por outro lado, reservas excessivas podem elevar custos sem necessidade ou podem não permitir um balanço efetivo de cargas. Assim, a margem adotada deve resultar de uma decisão técnica, considerando o tipo de instalação, a probabilidade de expansão, o balanceamento entre fases e as condições econômicas do projeto.

9.2.8 Conferência final do quadro de cargas

Antes de ser utilizado nas etapas posteriores, o quadro de cargas deve passar por uma conferência final. Essa verificação deve observar se todos os circuitos possuem identificação, se as potências estão coerentes com o levantamento, se as fases foram distribuídas adequadamente, se as correntes foram calculadas com os critérios corretos e se as observações técnicas estão claras.

Uma sequência prática de conferência pode incluir:

1. Verificar se todas as cargas do levantamento aparecem no quadro;
2. Conferir se os circuitos estão compatíveis com a planta elétrica;
3. Confirmar diferenças de potencial elétrico, número de fases e fator de potência;
4. Verificar se as correntes foram obtidas conforme os critérios do Capítulo 4;
5. Observar o balanceamento entre fases nos quadros trifásicos;
6. Conferir se circuitos dedicados estão claramente identificados;
7. Registrar premissas, reservas, dados estimados e observações relevantes.

Essa conferência reduz a probabilidade de inconsistências entre documentos e facilita a comunicação entre projetista, executor, equipe de manutenção e responsável técnico. Em projetos industriais, nos quais há grande quantidade de circuitos, essa etapa é indispensável para evitar erros acumulados ao longo do desenvolvimento do projeto.

9.3 Resumo do capítulo

Neste capítulo, o quadro de cargas foi apresentado como documento técnico de síntese entre o levantamento de cargas, a planta elétrica, os diagramas elétricos e o memorial de cálculo. Sua função é reorganizar as cargas em circuitos, fases, setores, quadros subordinados e critérios de alimentação, permitindo que a instalação seja analisada, executada, revisada e mantida com rastreabilidade.

Foram discutidos critérios de agrupamento funcional, incluindo circuitos de iluminação, tomadas, força, cargas dedicadas, circuitos auxiliares, automação, comunicação e sistemas complementares. Também foi destacada a possibilidade de estrutura hierárquica, na qual um quadro geral pode alimentar quadros secundários, formando uma organização aninhada adequada a instalações de maior porte, especialmente industriais.

A estrutura tabular do quadro foi ampliada com campos como identificação do circuito, descrição, setor, distância aproximada, diferença de potencial elétrico, fases, potência, fator de potência, corrente de projeto, proteção e observações, permitindo registrar informações úteis para a queda de diferença de potencial elétrico, cargas críticas, circuitos dedicados, reservas e premissas de expansão.

Também foram abordados o cálculo da corrente de projeto, o uso do fator de potência equivalente e a comparação entre aproximações simplificadas e o método baseado nas parcelas ativa e reativa das cargas, destacando-se que instalações industriais podem exigir análise fasorial mais completa. Por fim, estudou-se o balanceamento de fases em sistemas trifásicos, com a diferença ΔI como indicador preliminar, além do uso de ferramentas computacionais para testar distribuições alternativas sem substituir o critério técnico do projetista.

Por fim, foram tratadas a rastreabilidade, a conferência final e a reserva de capacidade do quadro. A inclusão de circuitos reserva foi apresentada não apenas como previsão de espaço físico, mas também como decisão elétrica que envolve barramentos, alimentadores, infraestrutura, proteção geral, expansão futura e coerência documental. Conclui-se que um quadro de cargas bem estruturado melhora a organização do projeto, apoia o balanceamento de fases, prepara o cálculo de demanda e fornece base segura para o dimensionamento posterior.

Capítulo 10

Cálculo de demanda

10.1 Introdução

O dimensionamento dos alimentadores principais e dos dispositivos gerais de proteção de uma instalação elétrica não deve ser realizado apenas pela soma direta das potências nominais das cargas. Conforme discutido no Capítulo 8, a potência instalada representa a capacidade total prevista no levantamento, mas não significa necessariamente que todas as cargas operarão ao mesmo tempo, em regime nominal e durante o mesmo intervalo de operação.

Após o levantamento de cargas e a organização dessas informações no quadro de cargas, apresentados respectivamente nos Capítulos 8 e 9, torna-se necessário estimar a potência que a instalação provavelmente solicitará da rede em condições reais de uso. Essa estimativa é denominada, de forma genérica, "demanda elétrica".

O cálculo de demanda estabelece uma ponte entre o quadro de cargas e o dimensionamento dos componentes principais da instalação. Ele permite estimar, com base nas características de uso do usuário final, a potência efetivamente considerada para alimentadores, entrada de serviço, quadros, dispositivos gerais de proteção e, em etapas posteriores, verificação de queda de tensão e capacidade de atendimento. Em projetos industriais, essa análise é particularmente importante, pois motores, compressores, sistemas de iluminação, tomadas, equipamentos de processo e cargas auxiliares podem apresentar regimes de operação muito distintos.

O objetivo deste capítulo é apresentar critérios utilizados para estimar a demanda provável da instalação, com base em fatores de simultaneidade, utilização, demanda, diversidade e serviço, também associado ao *duty cycle*.

! Importante

Dimensionamento: O cálculo de demanda é fundamental para evitar o "sub" ou "super" dimensionamento da instalação. Um sistema subdimensionado pode operar sob sobrecarga, resultando em quedas de tensão excessivas e atuações indevidas dos dispositivos de proteção. Por outro lado, o superdimensionamento eleva desnecessariamente os custos do projeto, impactando a aquisição de componentes, como condutores de grande seção, que representam um dos itens de maior valor agregado em uma instalação. Além disso, o excesso de capacidade pode refletir em custos inflacionados de infraestrutura, componentes da entrada de serviço, quadros e dispositivos de proteção.

10.2 Desenvolvimento teórico

A demanda elétrica representa a potência prevista para uma condição real ou provável de operação da instalação. Em condições normais de projeto, essa potência é menor ou, no limite, igual à potência instalada, pois a instalação não opera com todas as cargas ligadas simultaneamente e em plena potência.

Saiba Mais

Potência elétrica demandada: A potência demandada pode parecer maior que a potência instalada quando a potência instalada foi registrada com base na **potência útil entregue pela carga**, e não na **potência elétrica absorvida da rede**. Isso ocorre com frequência em equipamentos eletromecânicos e eletrotérmicos, nos quais a potência indicada pode representar uma saída mecânica ou térmica, e não diretamente a entrada elétrica.

No caso dos motores, independentemente do número de fases do sistema ou do tipo de sinal de alimentação, a potência nominal geralmente corresponde à potência mecânica disponível no eixo. Assim, um motor de $5\,[\text{cv}]$ (unidade de medida de potência, referente a um *cavalo-vapor*) apresenta aproximadamente:

$$P_{mec} = 5\,[\text{cv}] \cdot 736\,\left[\frac{\text{W}}{\text{cv}}\right] = 3680\,[\text{W}].$$

Entretanto, se o rendimento for $\eta = 0{,}85$, a potência elétrica ativa absorvida será:

$$P_{eletr} = \frac{P_{mec}}{\eta} = \frac{3680}{0{,}85} \approx 4329\,[\text{W}].$$

Portanto, se o projetista registrar no levantamento apenas $3680\,[\text{W}]$ como potência instalada, mas calcular a demanda a partir da potência elétrica absorvida, a potência demandada poderá parecer maior que a potência instalada.

Situação semelhante pode ocorrer com cargas térmicas. Em um aquecedor, forno ou resistência elétrica, se a potência útil térmica for P_{term} e o rendimento for η, a potência elétrica necessária será:

$$P_{eletr} = \frac{P_{term}}{\eta}.$$

Por exemplo, se um equipamento térmico deve fornecer $10\,[\text{kW}]$ úteis com rendimento $\eta = 0{,}50$, a potência elétrica absorvida será:

$$P_{eletr} = \frac{10}{0{,}50} \approx 20{,}0\,[\text{kW}].$$

Nesse caso, a entrada elétrica é maior que a potência térmica útil especificada.

Já em equipamentos de climatização, deve-se ter cuidado adicional. Uma capacidade de refrigeração indicada em $[\text{BTU/h}]$ ou em $[\text{kW}]$ térmico não representa necessariamente a potência elétrica absorvida. Como esses equipamentos transferem calor por meio de um ciclo termodinâmico, a relação entre potência térmica e potência elétrica depende do coeficiente de desempenho, usualmente indicado por COP, do inglês *Coefficient of Performance*:

$$P_{eletr} = \frac{P_{term}}{COP}.$$

Assim, um ar-condicionado com capacidade térmica de $12000\,[\text{BTU/h}]$, aproximadamente $3517\,[\text{W}]$ térmicos, e $COP = 3{,}0$, teria potência elétrica aproximada:

$$P_{eletr} = \frac{3517}{3{,}0} \approx 1172\,[\text{W}].$$

Esses exemplos mostram que potências mecânicas, térmicas e elétricas não devem ser somadas ou comparadas sem conversão adequada. **Para o quadro de cargas e para o cálculo da demanda elétrica, deve-se utilizar a potência elétrica absorvida da rede**, registrando no memorial de cálculo a origem do dado, o rendimento, o fator de potência, o COP ou qualquer premissa adotada na conversão.

Desambiguação

Potência mecânica: As unidades [cv], [hp], [PS] e [ch] estão associadas à ideia histórica de potência equivalente a "cavalos", mas não são sempre idênticas. O cavalo-vapor [cv] é uma unidade métrica, com $1\,[\text{cv}] \approx 735{,}5\,[\text{W}]$; o horsepower mecânico [hp], comum em países anglo-saxões, vale aproximadamente $1\,[\text{hp}] \approx 745{,}7\,[\text{W}]$; já [PS], do alemão *Pferdestärke*, e [ch], do francês *cheval-vapeur*, são praticamente equivalentes ao cavalo-vapor métrico. Por isso, em cálculos de projeto elétrico, recomenda-se sempre converter essas unidades para watt [W] ou quilowatt [kW] antes de calcular corrente, demanda ou potência aparente.

Em uma residência, por exemplo, é pouco provável que iluminação, micro-ondas, ar-condicionado, bomba de piscina, televisão e todos os demais equipamentos estejam funcionando simultaneamente em seus valores nominais máximos. Em uma instalação industrial, ocorre fenômeno semelhante: motores, máquinas, compressores, iluminação e tomadas possuem ciclos de funcionamento diferentes. Algumas cargas operam continuamente, outras operam por ciclos, e outras são acionadas apenas em situações específicas.

Nota

Potência instalada e demanda: A potência instalada já foi definida no Capítulo 8 como a soma das potências nominais das cargas previstas. Neste capítulo, essa grandeza será usada como ponto de partida para estimar a demanda, isto é, a parcela da potência instalada que deve ser considerada para uma condição provável de operação.

10.2.1 Demanda e fator de demanda

A **demanda provável**, representada por D, corresponde à potência que se espera solicitar da instalação, de um quadro, de um setor ou de um grupo de cargas na condição mais significativa para o dimensionamento. Conforme discutido no Capítulo 2, a potência em corrente alternada pode ser analisada em termos de potência ativa P, potência reativa Q e potência aparente S, grandezas relacionadas entre si pelo triângulo de potências.

O **fator de demanda**, representado por f_d, relaciona a demanda provável com a potência instalada correspondente. De forma geral, para uma grandeza de potência $\mathcal{P}$, com $\mathcal{P} \in \{P, Q, S\}$, pode-se escrever:

$$\mathrm{f}_d = \frac{D_{\mathcal{P}}}{\mathcal{P}} \tag{10.1}$$

onde:

- $D_{\mathcal{P}}$ é a demanda provável associada à grandeza $\mathcal{P}$, também denominada como *demanda máxima provável*;
- $\mathcal{P}$ é a potência instalada correspondente à potência ativa, reativa ou aparente;
- f_d é o fator de demanda, adimensional $[1]$.

Assim, podem ser estimadas, de modo simplificado, as demandas ativa, reativa e aparente por:

$$D_P = \mathrm{f}_d \cdot P, \qquad D_Q = \mathrm{f}_d \cdot Q, \qquad D_S = \mathrm{f}_d \cdot S. \tag{10.2}$$

Nessa formulação, a modo de desmbiguação, P é a potência ativa instalada, em watt [W]; Q é a potência reativa instalada, em volt-ampere reativo [VAr]; e S é a potência aparente instalada, em volt-ampere [VA].

Deve-se observar que o f_d não altera a natureza física da grandeza considerada; ele apenas ajusta a magnitude para uma condição provável de utilização. Portanto, a razão deve sempre ser feita entre grandezas da mesma espécie.

Nota

Uso do mesmo fator de demanda: A aplicação de um mesmo fator de demanda às potências ativa, reativa e aparente constitui uma aproximação didática útil quando se admite que o perfil de utilização das cargas reduz proporcionalmente as três componentes de potência. Em análises mais detalhadas, especialmente quando há cargas com fatores de potência muito diferentes, bancos de capacitores, motores com regimes variáveis ou equipamentos eletrônicos não lineares, pode ser necessário calcular separadamente as parcelas ativa, reativa e aparente da demanda.

Quando $f_d = 1$, considera-se que toda a potência instalada pode ser solicitada na condição analisada. Quando $f_d < 1$, admite-se que a demanda provável será inferior à potência instalada, em razão do perfil de uso.

Definição

Fator de demanda: Relação entre a demanda provável e a potência instalada de uma instalação, quadro, setor ou grupo de cargas. Esse fator expressa, de forma sintética, quanto da potência instalada deve ser considerado para fins de dimensionamento em uma condição representativa de operação.

A Tabela 10.1 apresenta fatores de demanda típicos. Esses valores possuem caráter aproximado, servindo como referência inicial para representar o comportamento esperado de diferentes tipos de carga.

Tabela 10.1: Fatores de demanda típicos para estudos preliminares

Tipo de carga	f_d	**Observação**
Iluminação residencial	0,80	Nem todos os ambientes permanecem iluminados simultaneamente.
Iluminação comercial	0,90	Uso mais contínuo durante o expediente.
Iluminação industrial	0,90	Frequentemente permanece ligada durante a operação.
Tomadas residenciais	0,70	Diversidade elevada de uso.
Tomadas comerciais	0,80	Uso moderado e mais previsível.
Tomadas industriais	0,80	Associadas a ferramentas e equipamentos auxiliares.
Micro-ondas	0,50	Uso eventual e de curta duração.
Geladeira	0,60	Compressor opera em ciclos.
Ar-condicionado	0,75	Operação dependente da temperatura ambiente.
Chuveiro elétrico	1,00	Carga elevada quando em operação.
Forno elétrico	0,70	Uso intermitente.
Bomba hidráulica pequena	0,80	Operação por ciclos.
Bomba de piscina	0,80	Uso programado ou intermitente.
Motor único	1,00	Considera-se operação plena.
Dois motores	0,95	Baixa diversidade operacional.
Motores de 3 a 5 unidades	0,85	Nem todos operam simultaneamente em plena carga.
Motores acima de 5 unidades	0,75	Maior diversidade operacional.
Equipamentos eletrônicos	0,70	Uso variável e baixa simultaneidade.
Carga resistiva geral	1,00	Quando ligada, opera próxima à potência nominal.
Equipamento industrial contínuo	0,90	Uso frequente durante o processo produtivo.

Assim, o fator de demanda pode ser entendido como um fator global de síntese. Ele pode incorporar, direta ou indiretamente, efeitos de simultaneidade, utilização, diversidade, ciclo de serviço e características específicas do processo ou do uso da edificação. Por essa razão, sua aplicação deve ser compatível com o nível de análise: circuito, quadro secundário, QGBT, setor, alimentação geral ou ponto de entrega.

Aviso

Interpretação do fator de demanda: O fator de demanda não deve ser usado como artifício para reduzir arbitrariamente o dimensionamento. Ele deve representar condições reais ou prováveis de operação, critérios normativos, dados de uso, medições, recomendações da concessionária ou premissas justificadas no memorial de cálculo.

Dando sequência ao exemplo didático da Tabela 9.3, a Tabela 10.2 detalha a aplicação de fatores de demanda específicos para cada circuito. Essa metodologia permite estimar diferenças de uso entre iluminação, tomadas, climatização, motores e reservas. O processo consiste em calcular a demanda individual de cada circuito a partir de sua potência instalada, considerando separadamente as parcelas ativa, reativa e aparente. A demanda total do quadro é definida pela composição desses resultados parciais.

Tabela 10.2: Estimativa de demanda por circuito usando fatores de demanda individuais

k	**Descrição**	cos ϕ	f_d	P [W]	D_P [W]	Q [VAr]	D_Q [VAr]	S [VA]	D_S [VA]	⅄	V [V]	Δl [m]	I_B [A]	**Observação**
01	Iluminação sala	1,00	0,80	300	240	0	0	300	240	**RN**	127	8 ± 3	1,89	Conjunto de luminárias.
02	Sala (1×TUG)	0,95	0,70	150	105	49	35	158	111	**SN**	127	7 ± 2	0,87	Equipamentos leves.
03	Cozinha (2×TUE)	0,98	0,53	1700	901	345	183	1735	919	**TR**	220	6 ± 2	4,18	Geladeira e micro-ondas.
04	Ar-condicionado	0,90	0,75	1200	900	581	436	1333	1000	**ST**	220	4 ± 1	4,55	Carga dedicada.
05	Bomba piscina	0,80	0,80	1500	1200	1125	900	1875	1500	**RST**	220	12 ± 5	3,94	Motor trifásico.
06	Reservado	1,00	1,00	800	800	0	0	800	800	**RS**	220	10 ± 5	3,64	Ampliação futura.
	Potência instalada total:			**5650**		**2101**		**6028**						
	Demanda estimada total:				**4146**		**1553**		**4427**					

Nota: S e D_S totais são calculados a partir das parcelas totais ativa e reativa, e não pela soma aritmética das potências aparentes individuais; contudo, pequenas diferenças podem ocorrer devido ao arredondamento dos valores apresentados nas linhas dos circuitos.

Na Tabela 10.2, as colunas P, Q e S apresentam as potências instaladas de cada circuito, enquanto as colunas D_P, D_Q e D_S apresentam as respectivas demandas estimadas após a aplicação do fator de demanda individual $f_{d,k}$, para cada circuito $k = 1, \ldots, 6$. Note que, na prática, fornecer todas essas colunas em uma tabela não é obrigatório e pode ser redundante. O objetivo, neste momento, é mostrar o processo de cálculo da demanda de forma detalhada, sendo que, didaticamente, algumas colunas poderão desaparecer ao longo do desenvolvimento do projeto.

Para cada circuito k, parte-se da potência ativa instalada P_k e do fator de potência $\cos\phi_k$. A potência aparente instalada e a potência reativa instalada podem ser calculadas, respectivamente, por:

$$S_k = \frac{P_k}{\cos\phi_k}, \tag{10.3}$$

$$Q_k = P_k \tan\left(\cos^{-1}(\cos\phi_k)\right) \qquad \text{ou} \qquad Q_k = \sqrt{S_k^2 - P_k^2}. \tag{10.4}$$

A corrente elétrica de projeto para cada circuito k, isto é, $I_{B,k}$, é calculada a partir da demanda aparente $D_{S,k}$. Note que na Tabela 9.3, os valores calculados são maiores, totalizando aproximadamente $26{,}07\,[\mathrm{A}]$ para a alimentação da residência completa, sem aplicação de fatores de demanda. Já na Tabela 10.2, os valores de corrente de projeto são menores, totalizando aproximadamente $19{,}07\,[\mathrm{A}]$. Apesar de o dimensionamento dos dispositivos de manobra e proteção não depender diretamente desses valores totais, a análise é válida para fins comparativos.

Para circuitos monofásicos ou ligados entre duas fases, utiliza-se:

$$I_{B,k} = \frac{D_{S,k}}{V_k}, \tag{10.5}$$

com base na Equação 4.4. Quando o circuito está ligado entre fase e neutro, a diferença de potencial elétrico é representada pela tensão de fase, isto é, $V_k := V_F = 127\,[\mathrm{V}]$. Para circuito trifásico equilibrado, utiliza-se:

$$I_{B,k} = \frac{D_{S,k}}{\sqrt{3}\,V_k}, \tag{10.6}$$

com base na Equação 4.5, em que a diferença de potencial elétrico é representada pela tensão de linha, isto é, $V_k := V_L = 220\,[\mathrm{V}]$. Nas Equações 10.5 e 10.6, $I_{B,k}$ incorpora um fator de demanda específico por carga.

Nota

Fator de potência total da residência: Com base na Tabela 10.2, o fator de potência total da residência deve ser calculado a partir da soma das parcelas ativa e reativa demandadas, e não pela média simples dos fatores de potência dos circuitos. Assim, usando os valores totais da tabela:

$$D_P = 4146\,[\mathrm{W}] \qquad \text{e} \qquad D_Q = 1553\,[\mathrm{VAr}].$$

A potência aparente equivalente da residência é obtida por:

$$D_{S,eq} = \sqrt{D_P^2 + D_Q^2} = \sqrt{4146^2 + 1553^2} \approx 4427\,[\mathrm{VA}].$$

Logo, o fator de potência equivalente da residência é:

$$\cos\phi_{eq} = \frac{D_P}{D_{S,eq}} = \frac{4146}{4427} \approx 0{,}94.$$

Portanto, para a condição de demanda estimada, a residência apresenta fator de potência total aproximado de $0{,}94$.

Essa forma de cálculo é mais detalhada que a aplicação de um único fator sobre a potência instalada total, pois permite diferenciar o comportamento operacional de cada tipo de carga. Entretanto, os fatores adotados continuam sendo premissas de projeto e devem ser justificados no memorial de cálculo, especialmente em instalações industriais ou em projetos sujeitos a requisitos específicos da concessionária.

Saiba Mais

Potência aparente equivalente: As potências ativa e reativa de um conjunto de cargas devem ser somadas separadamente, pois correspondem a componentes ortogonais de uma grandeza vetorial (potência complexa):

$$P_\Sigma = \sum P_k \qquad \text{e} \qquad Q_\Sigma = \sum Q_k. \tag{10.7}$$

A potência aparente total, entretanto, não deve ser obtida pela soma aritmética das potências aparentes individuais quando as cargas possuem fatores de potência diferentes. Nessa situação, deve-se primeiro somar as parcelas ativa e reativa e, em seguida, calcular a hipotenusa do triângulo de potências equivalente:

$$S_{eq} = \sqrt{P_\Sigma^2 + Q_\Sigma^2}. \tag{10.8}$$

Na Tabela 10.2, para a potência instalada, tem-se:

$$P_\Sigma = 5650\,[\mathrm{W}], \qquad Q_\Sigma = 2101\,[\mathrm{VAr}] \quad \text{logo:} \quad S_{eq} = \sqrt{5650^2 + 2101^2} \approx 6028\,[\mathrm{VA}].$$

Esse valor é diferente da soma aritmética das potências aparentes individuais, que seria:

$$Q_\Sigma = \sum S_k = 6201\,[\mathrm{VA}], \quad \text{então:} \quad S_{eq} \neq Q_\Sigma.$$

O mesmo raciocínio vale para a demanda estimada:

$$D_{P,\Sigma} = 4146\,[\mathrm{W}], \qquad D_{Q,\Sigma} = 1553\,[\mathrm{VAr}], \qquad D_{S,eq} \approx 4427\,[\mathrm{VA}].$$

Assim, a potência aparente equivalente representa a composição vetorial entre as parcelas ativa e reativa do conjunto, enquanto a soma aritmética das potências aparentes individuais pode superestimar o valor total.

10.2.2 Fator de utilização

O **fator de utilização**, representado por f_u, indica a parcela da potência nominal ou instalada que é efetivamente utilizada por uma carga na condição de operação analisada. Enquanto a potência nominal representa uma capacidade de referência informada pelo fabricante, pelo levantamento de cargas ou pelo critério de previsão adotado, a potência utilizada procura representar a solicitação real ou provável dessa carga durante o funcionamento.

De forma geral, para uma grandeza de potência $\mathcal{P}$, com $\mathcal{P} \in \{P, Q, S\}$, pode-se escrever:

$$\mathrm{f}_{u,k} = \frac{\mathcal{P}_{u,k}}{\mathcal{P}_k}, \tag{10.9}$$

onde:

- $\mathcal{P}_k$ é a potência nominal ou instalada da carga k;
- $\mathcal{P}_{u,k}$ é a potência efetivamente utilizada pela carga k na condição considerada;
- $\mathrm{f}_{u,k}$ é o fator de utilização da carga k, adimensional $[1]$.

Assim, a potência utilizada pode ser estimada por:

$$\mathcal{P}_{u,k} = \mathrm{f}_{u,k} \cdot \mathcal{P}_k. \tag{10.10}$$

Quando $\mathrm{f}_{u,k} = 1$, considera-se que a carga pode operar utilizando integralmente sua potência nominal na condição analisada. Quando $\mathrm{f}_{u,k} < 1$, admite-se que a carga opera, de forma usual ou provável, abaixo de sua potência nominal. Essa situação é comum em motores, bombas, compressores, máquinas operatrizes, equipamentos de climatização e cargas de processo que podem trabalhar em regime parcial.

Definição

Fator de utilização: Relação entre a potência efetivamente usada por uma carga e sua potência nominal ou instalada. Indica quanto da capacidade nominal deve ser considerado na condição de operação adotada para o estudo.

O fator de utilização deve ser usado no nível de um circuito terminal. Em um motor, por exemplo, ele representa o fato de a carga mecânica no eixo ser inferior à potência nominal do equipamento. Em um circuito de tomadas de uso geral, representa a estimativa de que os equipamentos conectados não solicitarão, de forma usual, toda a potência prevista para o circuito. Em ambos os exemplos, o fator não é arbitrário, mas com base no uso esperado, em dados de fabricante, experiência de projeto ou critérios previamente justificados no memorial de cálculo.

A diferença entre fator de utilização e fator de demanda deve ser observada com cuidado. O fator de utilização atua, em princípio, sobre a carga individual, enquanto o fator de demanda pode ser empregado como um coeficiente mais global, relacionando diretamente a demanda provável com a potência instalada. Por essa razão, em muitas abordagens práticas, o fator de demanda acaba "absorvendo" em um único coeficiente os outros fatores.

Desse modo, quando não são adotados outros fatores ou critérios separados (e.g.: simultaneidade, diversidade, regime de operação), o fator de demanda pode se aproximar, na prática, do próprio fator de utilização: $\mathrm{f}_{d,k} \approx \mathrm{f}_{u,k}$.

Aviso

Evitar dupla redução: Quando um fator de demanda já foi obtido de uma tabela normativa, de uma recomendação da concessionária, de uma medição ou de um critério consolidado de projeto, deve-se verificar se ele já incorpora efeitos de utilização, simultaneidade, diversidade ou outro critério de estimativa de demanda. A aplicação adicional de f_u, ou outro fator, sem essa verificação pode resultar em subestimação da demanda.

10.2.3 Fator de simultaneidade

O fator de simultaneidade é empregado para representar a possibilidade de que diferentes cargas, equipamentos, pontos de utilização ou circuitos não estejam em funcionamento ao mesmo tempo.

Os fatores apresentados nesta seção possuem caráter didático e servem para estudos preliminares; em projetos reais, devem ser verificadas as normas aplicáveis, os requisitos da concessionária, os dados de fabricante, o perfil de uso das cargas, as medições disponíveis e as características específicas da instalação.

O **fator de simultaneidade**, representado por f_s, está associado à coincidência de funcionamento das cargas em determinado agrupamento. Enquanto o fator de utilização ajusta a potência de uma carga ou circuito para uma condição provável de uso em relação ao seu valor nominal, o fator de simultaneidade procura representar se diferentes cargas, pontos ou circuitos estarão funcionando ao mesmo tempo na condição analisada.

O fator de simultaneidade deve ser adotado no mesmo nível de análise: circuito, conjunto de circuitos, quadro secundário, setor, QGBT ou alimentação geral. Quando se deseja aplicar simultaneamente o fator de utilização e o fator de simultaneidade a uma grandeza de potência $\mathcal{P}$, com $\mathcal{P} \in \{P, Q, S\}$, pode-se escrever, para cada circuito k:

$$D_{\mathcal{P},k} = \mathcal{P}_k \cdot \mathrm{f}_{u,k} \cdot \mathrm{f}_{s,k}. \tag{10.11}$$

Nessa formulação, $\mathrm{f}_{u,k}$ representa a parcela da potência nominal efetivamente utilizada pela carga ou circuito, enquanto $\mathrm{f}_{s,k}$ representa a coincidência de funcionamento no nível analisado. Assim, f_u e f_s descrevem efeitos distintos e podem ser combinados quando essa distinção for tecnicamente justificável.

Nota

Aplicabilidade do fator de simultaneidade: Para que a aplicação de f_s por circuito tenha interpretação física mais clara, é conveniente que o circuito analisado represente um conjunto de cargas com vários pontos de utilização, várias luminárias ou vários equipamentos. Em um circuito que alimenta uma única carga dedicada, como uma geladeira, um micro-ondas ou um motor específico, o fator de simultaneidade interno praticamente não possui o que comparar, pois há apenas uma carga associada àquele circuito. Nesses casos, a redução da potência de cálculo deve ser justificada preferencialmente pelo fator de utilização, pelo ciclo de operação, pelo regime de funcionamento ou por um fator de simultaneidade aplicado em nível superior, como o conjunto de circuitos do quadro.

Com o objetivo de evidenciar com maior clareza a aplicabilidade do fator de simultaneidade, o exemplo didático da Tabela 10.2 é ampliado antes da aplicação desse fator. A modificação principal consiste em substituir alguns agrupamentos muito simplificados por circuitos mais representativos de uma instalação real, nos quais a simultaneidade de uso possa ser interpretada de forma tecnicamente mais coerente. As alterações adotadas são descritas a seguir:

- **Ampliação dos circuitos de tomadas de uso geral:** o circuito de tomadas da sala, anteriormente representado por apenas uma tomada de uso geral, é substituído por um conjunto mais representativo. São considerados três circuitos bifásicos: um circuito da sala com quatro TUG, um circuito da cozinha com três TUG e um circuito da garagem com duas TUG. Desse modo, torna-se mais adequado admitir que nem todos os pontos de tomada estejam alimentando cargas simultaneamente. Assume-se que cada TUG consome aproximadamente $150\,[\mathrm{W}]$.
- **Separação das cargas de uso específico da cozinha:** a potência anteriormente agrupada como "cozinha" é dividida em dois circuitos dedicados: um para a geladeira, com $500\,[\mathrm{W}]$, e outro para o micro-ondas, com $1200\,[\mathrm{W}]$. Essa separação melhora a leitura do quadro de cargas, pois distingue uma carga com funcionamento cíclico e prolongado, como a geladeira, de uma carga de uso intermitente e curta duração, como o micro-ondas.
- **Inclusão de novos circuitos e reservas:** são acrescentados dois circuitos monofásicos de iluminação, um para a cozinha, ligado entre a fase **S** e o neutro, e outro para o quintal, ligado entre a fase **T** e o neutro. Também é incluído um motor bifásico, de $750\,[\mathrm{W}]$, independente para a bomba da caixa d'água, além do motor trifásico da bomba da piscina. Por fim, adotam-se dois circuitos de reserva trifásicos, ambos de e $800\,[\mathrm{W}]$, tratados como previsão de ampliação futura e não como cargas necessariamente em operação na condição atual.

Nota

Potência de uma TUG: Neste exemplo didático, foi adotada a potência de 150 [W] por ponto de tomada de uso geral apenas como premissa simplificada de carga provável, associada a pequenos equipamentos. Esse valor não deve ser interpretado como critério mínimo normativo da **ABNT NBR 5410**.
Pela lógica normativa, a previsão de carga em locais de habitação é usualmente expressa em volt-ampere [VA], e não diretamente em watt [W]. Para ambientes residenciais adota-se como referência mínima 100 [VA] por TUG. Para banheiros, cozinhas, copas, áreas de serviço, lavanderias e locais semelhantes, o critério é mais severo: consideram-se 600 [VA] por ponto para as três primeiras TUG e 100 [VA] para os pontos excedentes, avaliando-se cada ambiente separadamente (ABNT NBR 5410, 2004; Creder, 2016; Cotrim, 2020).

Em um projeto normativo, a previsão mínima de carga das TUG deve ser verificada conforme os critérios aplicáveis da **ABNT NBR 5410** e, quando necessário, ajustada às características reais dos equipamentos previstos.

Com essas modificações, a aplicação do fator de simultaneidade passa a ter maior significado didático, pois alguns circuitos representam agrupamentos com vários pontos de utilização, enquanto outros correspondem a cargas dedicadas, motores ou reservas. Essa distinção permite discutir com mais precisão quando a simultaneidade pode ser aplicada de forma plausível e quando a redução da potência de cálculo deve ser interpretada com maior cautela.

Na Tabela 10.3, essa ideia é aplicada ao conjunto ampliado de circuitos. Nesse exemplo, os fatores de utilização representam a parcela da potência nominal considerada em cada circuito, enquanto os de simultaneidade indicam a probabilidade de coincidência de funcionamento dos pontos ou circuitos na condição de operação.

Tabela 10.3: Estimativa de demanda por circuito considerando fatores de utilização e simultaneidade

k	**Descrição**	cos ϕ	f_u	f_s	P [W]	D_P [W]	Q [VAr]	D_Q [VAr]	S [VA]	D_S [VA]	⅄	V [V]	Δl [m]	I_B [A]	**Observação**
01	Iluminação sala	1,00	0,80	1,00	300	240	0	0	300	240	**RN**	127	8 ± 3	1,89	Circuito original.
02	Iluminação cozinha	1,00	0,80	0,90	400	288	0	0	400	288	**SN**	127	6 ± 2	2,27	Novo circuito.
03	Iluminação quintal	1,00	0,80	0,80	200	128	0	0	200	128	**TN**	127	14 ± 5	1,01	Uso eventual.
04	TUG sala	0,95	0,70	0,60	600	252	197	83	632	265	**RS**	220	7 ± 2	1,21	4 TUG.
05	TUG cozinha	0,95	0,70	0,70	450	221	148	72	474	232	**ST**	220	6 ± 2	1,06	3 TUG.
06	TUG garagem	0,95	0,70	0,50	300	105	99	35	316	111	**TR**	220	10 ± 3	0,50	2 TUG.
07	TUE geladeira	0,85	0,70	1,00	500	350	310	217	588	412	**RN**	127	6 ± 2	3,24	Funcionamento cíclico.
08	TUE micro-ondas	0,98	0,50	1,00	1200	600	244	122	1224	612	**TR**	220	6 ± 2	2,78	Uso intermitente.
09	Ar-condicionado	0,90	0,75	0,90	1200	810	581	392	1333	900	**ST**	220	4 ± 1	4,09	Climatização.
10	Bomba piscina	0,80	0,80	0,50	1500	600	1125	450	1875	750	**RST**	220	12 ± 5	1,97	Motor trifásico.
11	Bomba caixa d'água	0,82	0,80	0,40	750	240	524	168	915	293	**RS**	220	11 ± 4	1,33	Motor bifásico.
12	Reserva 1	1,00	1,00	0,50	800	400	0	0	800	400	**RST**	220	10 ± 5	1,05	Ampliação futura.
13	Reserva 2	1,00	1,00	0,50	800	400	0	0	800	400	**RST**	220	10 ± 5	1,05	Ampliação futura.
	Potência instalada total:				**9000**		**3227**		**9561**						
	Demanda simultânea estimada:					**4634**		**1538**		**4882**					

Nota: A tabela amplia o exemplo anterior por meio da separação de circuitos de iluminação, TUG, TUE, motores e reservas. Nos circuitos de TUG, adota-se a premissa didática de 150 [W] por ponto, apenas para permitir a discussão de demanda, simultaneidade e balanceamento de fases. Os fatores f_u e f_s foram aplicados por circuito; pequenas diferenças nos totais podem ocorrer devido ao arredondamento. Também, a distância aproximada Δl tem como referência o quadro alimentador mais próximo a montante de cada circuito k, seguindo a topologia da instalação, contudo, perceba que sem a implementação do conceito de aninhamento esta descrição pode ser ambígua.

A ampliação do exemplo torna a aplicação de f_s mais coerente. Nos circuitos de tomadas de uso geral, por exemplo, o fator de simultaneidade passa a representar a possibilidade de que apenas parte dos pontos esteja efetivamente alimentando equipamentos no instante de maior solicitação provável. O mesmo raciocínio pode ser aplicado aos circuitos de iluminação, especialmente quando há ambientes com padrões diferentes de uso. Já nos circuitos dedicados, a simultaneidade deve ser interpretada com cuidado, pois o circuito corresponde a uma carga específica.

O exemplo da Tabela 10.3 faz sentido quando se deseja estimar a utilização e a coincidência de funcionamento circuito por circuito. No entanto, essa não é a única forma de aplicar o fator de simultaneidade. Também é possível aplicar esse fator diretamente ao conjunto da instalação, de um quadro ou de um setor, aplicando o conceito de aninhamento de cargas. Nesse segundo procedimento, calcula-se primeiro a potência utilizada de cada circuito considerando o fator de utilização e, em seguida, aplica-se um fator de simultaneidade por agrupamento.

Para ilustrar essa segunda interpretação, a Tabela 10.4 reorganiza os circuitos da Tabela 10.3 em uma estrutura aninhada, na qual cada quadro subordinado é tratado como uma carga composta do quadro alimentador. Os valores equivalentes de f_u e f_s representam o comportamento agregado dos circuitos internos de cada quadro, permitindo analisar a simultaneidade no nível do agrupamento, e não apenas no nível de cada circuito terminal.

Tabela 10.4: Aplicação do fator de simultaneidade em agrupamentos aninhados por quadro subordinado.

k	**Carga**	$\cos\phi$	f_u	f_s	P [W]	D_P [W]	Q [VAr]	D_Q [VAr]	S [VA]	D_S [VA]	⅄	V [V]	Δl [m]	I_B [A]	**Observação**
10	**QS-Sala**	**0,94**	**—**	**0,84**	**2100**	**1302**	**778**	**475**	**2239**	**1386**	**RST**	220	8 ± 3	**3,64**	—
11	↪ Iluminação	1,00	0,80	1,00	300	240	0	0	300	240	**RN**	127	3 ± 1	1,89	Luminárias.
12	↪ 4×TUG	0,95	0,70	0,60	600	252	197	83	632	265	**RS**	220	4 ± 1	1,21	Carga leve.
13	↪ Ar-condicionado	0,90	0,75	0,90	1200	810	581	392	1333	900	**ST**	220	1 ± 1	4,09	Carga dedicada.
20	**QS-Cozinha**	**0,96**	**—**	**0,92**	**2550**	**1459**	**702**	**411**	**2645**	**1516**	**RST**	220	16 ± 6	**3,98**	—
21	↪ Iluminação	1,00	0,80	0,90	400	288	0	0	400	288	**SN**	127	3 ± 1	2,27	Luminárias.
22	↪ 3×TUG	0,95	0,70	0,70	450	221	148	72	474	232	**ST**	220	4 ± 1	1,06	Carga leve.
23	↪ TUE geladeira	0,85	0,70	1,00	500	350	310	217	588	412	**RN**	127	3 ± 1	3,24	Carga cíclica.
24	↪ TUE micro-ondas	0,98	0,50	1,00	1200	600	244	122	1224	612	**TR**	220	4 ± 1	2,78	Uso intermitente.
30	**QS-Garagem**	**0,98**	**—**	**0,63**	**500**	**233**	**99**	**35**	**510**	**236**	**RT**	220	12 ± 5	**0,62**	—
31	↪ Iluminação	1,00	0,80	0,80	200	128	0	0	200	128	**TN**	127	3 ± 1	1,01	Uso eventual.
32	↪ 2×TUG	0,95	0,70	0,50	300	105	99	35	316	111	**TR**	220	5 ± 1	0,50	Carga leve.
40	**QS-Bombas**	**0,81**	**—**	**0,47**	**2250**	**840**	**1649**	**618**	**2790**	**1043**	**RST**	220	2 ± 1	**2,74**	—
41	↪ Piscina	0,80	0,80	0,50	1500	600	1125	450	1875	750	**RST**	220	2 ± 1	1,97	Motor trifásico.
42	↪ Caixa d'água	0,82	0,80	0,40	750	240	524	168	915	293	**RS**	220	1 ± 1	1,33	Motor bifásico.
50	**QS-Reserva 1**	**1,00**	**—**	**0,50**	**800**	**400**	**0**	**0**	**800**	**400**	**RST**	220	10 ± 5	**1,05**	Sem subcircuitos
60	**QS-Reserva 2**	**1,00**	**—**	**0,50**	**800**	**400**	**0**	**0**	**800**	**400**	**RST**	220	10 ± 5	**1,05**	Sem subcircuitos
	Potência instalada total:				**9000**		**3227**		**9561**						
	Demanda simultânea estimada:					**4634**		**1538**		**4882**					

Nota: As linhas em negrito representam quadros subordinados tratados como cargas compostas do quadro alimentador. As linhas indentadas representam os circuitos terminais internos de cada quadro. Nos quadros subordinados, o campo f_u é indicado por "—", pois neste exemplo os fatores de utilização são aplicados apenas nos circuitos terminais. O fator f_s indicado nas linhas dos quadros é um valor de projeto adotado para representar a simultaneidade entre os circuitos internos do respectivo quadro.

A Tabela 10.4 permite distinguir três formas de aplicar o fator de simultaneidade, conforme o nível de análise adotado. A escolha entre essas formas deve considerar se a simultaneidade está sendo avaliada dentro de um circuito terminal, entre circuitos de um mesmo agrupamento ou em uma estrutura aninhada de quadros e cargas:

- **Aplicação por circuito terminal:** atribui-se um fator $\mathrm{f}_{s,k}$ a cada circuito k, conforme a Equação 10.11. Nesse caso, $\mathrm{f}_{s,k}$ representa a simultaneidade interna do próprio circuito, como ocorre em circuitos com vários pontos de iluminação, várias TUG ou pequenos equipamentos conectados ao mesmo circuito;
- **Aplicação por agrupamento:** calcula-se primeiro a potência utilizada dos circuitos considerando apenas os fatores de utilização $\mathrm{f}_{u,k}$ e, em seguida, aplica-se um único fator de simultaneidade ao conjunto analisado:

$$D_{\mathcal{P},\text{grupo}} = \mathrm{f}_{s,\text{grupo}} \cdot \sum_{k=1}^{n} \left(\mathcal{P}_k \cdot \mathrm{f}_{u,k}\right), \tag{10.12}$$

onde $\mathrm{f}_{s,\text{grupo}}$ representa a simultaneidade entre os circuitos do agrupamento e não a simultaneidade interna de cada circuito individualmente. Assim, nesse procedimento $\mathrm{f}_{s,\text{grupo}}$ e $\mathrm{f}_{s,k}$ são critérios mutuamente excludentes.

- **Aplicação em estrutura aninhada:** quando um quadro subordinado reúne vários circuitos internos, pode-se aplicar $f_{s,k}$ aos circuitos aninhados e simultaneamente aplicar $f_{s,\text{grupo}}$ ao agrupamento correspondente:

$$D_{\mathcal{P},\text{grupo}} = f_{s,\text{grupo}} \cdot \sum_{k=1}^{n} \left(\mathcal{P}_k \cdot f_{u,k} \cdot f_{s,k} \right), \tag{10.13}$$

onde $f_{s,\text{grupo}}$ e $f_{s,k}$ são critérios complementares. Essa abordagem só é coerente quando os fatores de simultaneidade representam fenômenos distintos: $f_{s,k}$ descreve a simultaneidade interna de cada circuito terminal, enquanto $f_{s,\text{grupo}}$ descreve a coincidência de funcionamento entre os circuitos ou cargas aninhadas no agrupamento.

A aplicação aninhada analisa níveis distintos de simultaneidade. Se o mesmo efeito for considerado mais de uma vez, a demanda poderá ser subestimada; por isso, a combinação de fatores exige justificativa técnica clara.

Importante

Aplicação por agrupamento: A análise da aplicabilidade do fator de simultaneidade deve considerar a informação disponível, o nível de detalhamento do projeto e a finalidade do cálculo. Em estudos preliminares ou exemplos didáticos, a aplicação por circuito pode ser útil para representar a simultaneidade interna de grupos simples, como circuitos de iluminação ou tomadas de uso geral. Já em análises de quadros, setores ou alimentações gerais que reúnem diversas cargas, a aplicação por agrupamento tende a representar melhor o comportamento global da instalação, pois considera a coincidência de funcionamento entre os circuitos internos.

A Tabela 10.5 apresenta valores didáticos típicos conforme o nível ou critério de agrupamento considerado.

Tabela 10.5: Fatores de simultaneidade típicos conforme o agrupamento analisado

Agrupamento	f_s **didático**	**Interpretação prática**
Aplicação em circuitos terminais com vários pontos ou aparelhos		
Iluminação de ambiente	0,80 a 1,00	Representa circuitos terminais com várias luminárias. Grande parte dos pontos pode operar simultaneamente, principalmente em horários noturnos ou em áreas de uso contínuo.
Tomadas de uso geral	0,40 a 0,80	Representa circuitos terminais com vários pontos de TUG. Nem todos os pontos costumam alimentar cargas ao mesmo tempo; o valor depende do perfil de ocupação e uso.
Conjunto de pequenos equipamentos	0,50 a 0,90	Aplica-se quando um circuito terminal alimenta vários aparelhos de uso não necessariamente simultâneo, como pequenos equipamentos de bancada, apoio ou manutenção.
Motores e cargas intermitentes	0,30 a 0,80	O valor depende do ciclo de operação, do comando automático e da possibilidade de partida ou funcionamento simultâneo das cargas conectadas ao circuito.
Carga dedicada essencial	1,00	Quando o circuito alimenta uma carga única, crítica ou permanente, em geral não se aplica redução por simultaneidade interna do circuito.
Aplicação em quadros, setores ou cargas aninhadas		
Quadro subordinado de ambiente	0,60 a 0,90	Representa a coincidência global entre circuitos internos de um quadro, como iluminação, TUG, TUE e climatização de um mesmo ambiente.
Quadro de cozinha, copa ou área de serviço	0,70 a 0,95	Pode haver coincidência significativa entre cargas, mas raramente todos os circuitos internos operam continuamente em potência máxima.
Quadro de motores ou bombas	0,40 a 0,80	Representa a simultaneidade entre motores ou cargas comandadas. O valor depende do processo, da automação, dos ciclos de operação e das condições de partida.
Setor da instalação	0,50 a 0,90	Usado quando um setor reúne vários quadros ou circuitos de naturezas diferentes. O fator representa a coincidência global de funcionamento do setor.
Instalação ou quadro geral	0,50 a 0,85	Representa a simultaneidade global entre setores, quadros subordinados e cargas principais. Deve ser adotado com cautela para evitar dupla redução de demanda.
Reserva ou ampliação futura	0,00 a 1,00	A adoção depende do critério do projeto: a reserva pode ser desconsiderada na condição atual ou incluída para avaliar capacidade futura da instalação.

Quando os efeitos de utilização e simultaneidade são reunidos em um único coeficiente, pode-se definir um fator de demanda equivalente para o grupo analisado. De forma simplificada, esse fator pode ser entendido como o coeficiente que relaciona diretamente a demanda estimada do conjunto com a potência instalada correspondente, absorvendo os efeitos representados separadamente por f_u e f_s. Em uma abordagem elementar, quando esses fatores são aplicados no mesmo nível de análise, pode-se escrever $\mathrm{f}_{d,\mathrm{eq}} \approx \mathrm{f}_u \cdot \mathrm{f}_s$; entretanto, essa interpretação pode variar conforme o autor, a norma, a concessionária ou a fonte técnica consultada, razão pela qual a convenção adotada deve ser sempre explicitada no memorial de cálculo.

10.2.4 Fator de serviço

O **ciclo de serviço**, também denominado *duty cycle*, está associado ao tempo relativo em que uma carga permanece em operação dentro de um intervalo de análise. Este comportamento também pode ser conhecido como *fator de ciclo de serviço* ou simplesmente **fator de serviço**. De forma geral, pode-se escrever:

$$\mathrm{f}_c = \frac{t_{\mathrm{ligado}}}{T}, \tag{10.14}$$

onde:

- t_{ligado} é o tempo durante o qual a carga permanece ligada ou em operação efetiva;
- T é o intervalo total de análise considerado;
- f_c é o fator de ciclo de serviço, adimensional $[1]$.

Quando $\mathrm{f}_c = 1$, a carga é considerada de funcionamento contínuo durante todo o intervalo analisado. Quando $\mathrm{f}_c < 1$, a carga é considerada intermitente, isto é, opera apenas durante parte do intervalo. Por exemplo, uma carga que permanece ligada durante $15\ [\mathrm{min}]$ a cada intervalo de $60\ [\mathrm{min}]$ apresenta:

$$\mathrm{f}_c = \frac{15}{60} = 0{,}25.$$

Em uma estimativa preliminar de energia consumida ou de potência média ao longo do intervalo T, medido em unidades de tempo, pode-se escrever: $P_{\mathrm{med}} \approx \mathrm{f}_c \cdot P_{\mathrm{nom}}$, em que P_{nom} representa a potência nominal da carga e P_{med} representa uma potência média aproximada no intervalo analisado.

De modo mais geral, para uma grandeza de potência $\mathcal{P}$, com $\mathcal{P} \in \{P, Q, S\}$, mara um circuito ou agrupação de carga k, a estimativa média associada ao ciclo de serviço pode ser escrita como:

$$\mathcal{P}_{\mathrm{med},k} \approx \mathrm{f}_{c,k} \cdot \mathcal{P}_k. \tag{10.15}$$

Essa formulação é útil para estimativas de energia, análise de regime de operação e comparação entre cargas contínuas e intermitentes. Entretanto, deve-se observar que a potência média não substitui, automaticamente, a potência instantânea exigida pela carga enquanto ela está ligada. Uma bomba, um compressor, um motor ou uma resistência elétrica intermitente pode solicitar corrente elevada durante seu período de funcionamento, mesmo que a potência média ao longo de uma hora seja reduzida.

Aviso

Uso do ciclo de serviço no dimensionamento: O fator de ciclo de serviço deve ser usado com cuidado no dimensionamento de condutores e dispositivos de proteção. A redução da potência média não significa, necessariamente, que a corrente de projeto do circuito possa ser reduzida na mesma proporção. Durante o intervalo em que a carga está ligada, os condutores, dispositivos de proteção e equipamentos de manobra devem suportar a corrente efetivamente solicitada pela carga, incluindo, quando aplicável, correntes de partida, sobrecargas transitórias e efeitos térmicos acumulados.

No cálculo de demanda, o ciclo de serviço pode auxiliar a interpretação do comportamento operacional da carga. Em alguns casos, ele pode ser usado como informação complementar para justificar um fator de utilização f_u, especialmente quando a carga não opera continuamente ou quando seu regime de funcionamento é bem conhecido. Também pode ser incorporado, de forma indireta, em um fator de demanda equivalente $f_{d,eq}$, quando a fonte técnica adotada utiliza um único coeficiente para representar simultaneamente a utilização de outros fatores.

Assim, uma carga intermitente pode ser analisada de duas formas distintas, conforme a finalidade do cálculo:

- **Estimativa de energia:** pode-se empregar diretamente o fator de ciclo de serviço para obter uma potência média no intervalo analisado;
- **Dimensionamento elétrico:** deve-se verificar se a corrente durante o período ligado é a condição determinante para condutores, dispositivos de proteção e equipamentos de manobra.

Essa distinção é essencial porque a instalação elétrica deve ser capaz de atender a carga no instante em que ela opera, e não apenas ao valor médio calculado em um intervalo longo.

Quando o ciclo de serviço é incluído em uma tabela de demanda, deve-se evitar confundi-lo com o fator de simultaneidade. Em uma mesma linha de cálculo, esses fatores são mutuamente excludentes. Em geral, adota-se o critério que melhor representa o fenômeno físico predominante: $f_{s,k}$ para não coincidência entre várias cargas e $f_{c,k}$ para operação intermitente de uma única carga.

A Tabela 10.6 apresenta uma adaptação do exemplo didático da Tabela 10.3, agora incluindo a coluna f_c ao lado da coluna f_s. O objetivo é evidenciar qual critério foi adotado em cada linha de cálculo.

Tabela 10.6: Exemplo de aplicação alternativa entre fator de simultaneidade e ciclo de serviço

k	Carga	$\cos\phi$	f_u	f_s	f_c	P [W]	D_P [W]	Q [VAr]	D_Q [VAr]	S [VA]	D_S [VA]	⅄	V [V]	Δl [m]	I_B [A]	Observação
10	**QS-Sala**	**0,94**	—	—	—	**2100**	**1302**	**778**	**475**	**2239**	**1386**	**RST**	220	8 ± 3	**3,64**	Resumo do quadro.
11	↪ Iluminação	1,00	0,80	1,00	—	300	240	0	0	300	240	**RN**	127	3 ± 1	1,89	Luminárias.
12	↪ 4×TUG	0,95	0,70	0,60	—	600	252	197	83	632	265	**RS**	220	4 ± 1	1,21	Carga leve.
13	↪ Ar-condicionado	0,90	0,75	0,90	—	1200	810	581	392	1333	900	**ST**	220	1 ± 1	4,09	Carga dedicada.
20	**QS-Cozinha**	**0,97**	—	—	—	**2550**	**691**	**702**	**161**	**2645**	**709**	**RST**	220	16 ± 6	**1,86**	Resumo do quadro.
21	↪ Iluminação	1,00	0,80	0,90	—	400	288	0	0	400	288	**SN**	127	3 ± 1	2,27	Luminárias.
22	↪ 3×TUG	0,95	0,70	0,70	—	450	221	148	72	474	232	**ST**	220	4 ± 1	1,06	Carga leve.
23	↪ TUE geladeira	0,85	0,70	—	0,35	500	122	310	76	588	144	**RN**	127	3 ± 1	1,13	Carga cíclica.
24	↪ TUE micro-ondas	0,98	0,50	—	0,10	1200	60	244	12	1224	61	**TR**	220	4 ± 1	0,28	Uso intermitente.
30	**QS-Garagem**	**0,98**	—	—	—	**500**	**233**	**99**	**35**	**510**	**236**	**RT**	220	12 ± 5	**0,62**	Resumo do quadro.
31	↪ Iluminação	1,00	0,80	0,80	—	200	128	0	0	200	128	**TN**	127	3 ± 1	1,01	Uso eventual.
32	↪ 2×TUG	0,95	0,70	0,50	—	300	105	99	35	316	111	**TR**	220	5 ± 1	0,50	Carga leve.
40	**QS-Bombas**	**0,81**	—	—	—	**2250**	**840**	**1649**	**618**	**2790**	**1043**	**RST**	220	2 ± 1	**2,74**	Resumo do quadro.
41	↪ Piscina	0,80	0,80	—	0,50	1500	600	1125	450	1875	750	**RST**	220	2 ± 1	1,97	Motor trifásico cíclico.
42	↪ Caixa d'água	0,82	0,80	—	0,40	750	240	524	168	915	293	**RS**	220	1 ± 1	1,33	Motor bifásico cíclico.
50	**QS-Reserva 1**	**1,00**	—	**0,50**	—	**800**	**400**	**0**	**0**	**800**	**400**	**RST**	220	10 ± 5	**1,05**	Sem subcircuitos.
60	**QS-Reserva 2**	**1,00**	—	**0,50**	—	**800**	**400**	**0**	**0**	**800**	**400**	**RST**	220	10 ± 5	**1,05**	Sem subcircuitos.
	Potência instalada total:					**9000**		**3227**		**9561**						
	Demanda operacional estimada:						**3866**		**1288**		**4075**					

Nota: Os valores $f_c = 0{,}35$ para a geladeira, $f_c = 0{,}10$ para o micro-ondas, $f_c = 0{,}50$ para a bomba da piscina e $f_c = 0{,}40$ para a bomba da caixa d'água foram adotados como premissas didáticas para representar cargas cíclicas ou intermitentes.

Na prática, o fator de ciclo de serviço é particularmente adequado para cargas cíclicas ou intermitentes, como geladeiras, micro-ondas, bombas, compressores e equipamentos que operam em intervalos bem definidos. Entretanto, para dimensionamento final de condutores e dispositivos de proteção, deve-se verificar se a corrente durante o período ligado é mais restritiva que a potência média representada pelo ciclo de serviço.

Desambiguação

Fator de ciclo de serviço e fator de serviço: O fator de ciclo de serviço f_c não deve ser confundido com o fator de serviço de motores, usualmente indicado por "FS" na placa de identificação. O ciclo de serviço descreve a fração de tempo de operação da carga dentro de um intervalo de análise; o fator de serviço do motor indica uma margem admissível de sobrecarga em condições especificadas pelo fabricante.

A Tabela 10.7 valores numéricos para f_c. Os valores têm caráter didático e ajudam a compreender a diferença entre potência instantânea, média e solicitação térmica ao longo do tempo.

Tabela 10.7: Fatores de ciclo de serviço típicos para cargas intermitentes

Carga ou regime	f_c	**Comentário**
Carga contínua	1,00	Permanece ligada durante todo o intervalo analisado.
Iluminação durante expediente	0,70 a 1,00	Depende da jornada e do controle de acendimento.
Geladeira ou compressor pequeno	0,30 a 0,70	Opera em ciclos comandados por temperatura.
Bomba de piscina	0,20 a 0,60	Normalmente opera em períodos programados.
Bomba de recalque	0,10 a 0,50	Depende do reservatório, consumo e automação.
Forno ou resistência com controle térmico	0,40 a 0,90	Ciclo parcial, potência instantânea alta.
Máquina industrial intermitente	0,30 a 0,80	Depende do ciclo produtivo e do tempo de espera.
Equipamento de emergência em espera	0,00 a 0,10	Opera apenas em testes, falhas ou contingências.

A principal interpretação da Tabela 10.7 é que cargas com o mesmo valor nominal podem produzir efeitos diferentes sobre a instalação, dependendo do tempo de operação, da frequência de acionamento e da duração dos intervalos de repouso. Por isso, o ciclo de serviço não deve ser analisado isoladamente.

10.2.5 Fator de diversidade

O **fator de diversidade**, representado por f_v, é utilizado para comparar a soma das demandas estimadas de diferentes cargas, quadros ou setores com a demanda estimada para o conjunto. Esse fator é particularmente importante quando se analisam quadros, setores, alimentadores principais ou instalações completas, pois as solicitações individuais dos agrupamentos raramente atingem seus maiores valores no mesmo instante.

De forma geral, para uma grandeza de potência $\mathcal{P}$, com $\mathcal{P} \in \{P, Q, S\}$, pode-se escrever:

$$f_v = \frac{\sum_{k=1}^{n} D_{\mathcal{P},k}}{D_{\mathcal{P},\text{conj}}}, \tag{10.16}$$

onde:

- $D_{\mathcal{P},k}$ é a demanda estimada do quadro, setor, circuito ou agrupamento k;
- $D_{\mathcal{P},\text{conj}}$ é a demanda estimada para o conjunto analisado;
- f_v é o fator de diversidade, adimensional $[1]$.

A partir da Equação 10.16, a demanda do conjunto pode ser estimada por:

$$D_{\mathcal{P},\text{conj}} = \frac{\sum_{k=1}^{n} D_{\mathcal{P},k}}{f_v}. \tag{10.17}$$

Nessa convenção, o fator de diversidade tende a ser maior que 1, pois a demanda máxima do conjunto costuma ser menor que a soma aritmética das demandas máximas individuais. Quanto maior for a diversidade de uso entre as cargas, maior tende a ser f_v e menor será a demanda máxima simultânea estimada para o conjunto.

Definição

Fator de diversidade: Relação entre a soma das demandas estimadas individuais e a demanda estimada do conjunto. Esse fator expressa o efeito da não coincidência dos máximos individuais quando as cargas são analisadas em conjunto.

Desambiguação

Demanda máxima e demanda estimada: Na terminologia clássica, *demanda máxima* designa o maior valor de demanda observado ou previsto em um intervalo de tempo, referindo-se ao pico de solicitação em uma curva de carga real ou simulada. Na prática, entretanto, as grandezas são obtidas a partir da potência instalada e dos fatores de projeto, sem recorrer a curvas temporais. Por isso, adota-se a expressão *demanda estimada* para indicar a potência provável de dimensionamento — interpretável como uma estimativa da condição mais severa esperada do quadro, mas não como um pico temporal obtido por medição nem como uma carga máxima do conjunto.

A Tabela 10.8 apresenta uma adaptação do exemplo didático da Tabela 10.6, agora incluindo uma linha de quadro geral. Assume-se que nesta implementação este quadro geral é o *quadro geral de baixa tensão* (QGBT, com nomenclatura $k : 00$). Por outro lado, adiciona-se uma coluna f_v para evidenciar a aplicação do fator de diversidade no nível mais agregado da instalação e não nos circuitos aninhados.

Tabela 10.8: Exemplo de aplicação do fator de diversidade no nível do quadro geral

k	Carga	$\cos\phi$	f_u	f_s	f_c	f_v	P [W]	D_P [W]	Q [VAr]	D_Q [VAr]	S [VA]	D_S [VA]	⅄	V [V]	Δl [m]	I_B [A]	Observação
00	**QGBT**	**0,95**	—	—	—	**1,15**	**9000**	**3362**	**3227**	**1120**	**9561**	**3543**	**RST**	220	—	**9,30**	Quadro principal.
10	↪ **QS-Sala**	**0,94**	—	—	—	—	**2100**	**1302**	**778**	**475**	**2239**	**1386**	**RST**	220	8 ± 3	**3,64**	Quadro secundário.
11	↪ Iluminação	1,00	0,80	1,00	—	—	300	240	0	0	300	240	**RN**	127	3 ± 1	1,89	Luminárias.
12	↪ 4×TUG	0,95	0,70	0,60	—	—	600	252	197	83	632	265	**RS**	220	4 ± 1	1,21	Carga leve.
13	↪ Ar-condicionado	0,90	0,75	0,90	—	—	1200	810	581	392	1333	900	**ST**	220	1 ± 1	4,09	Carga dedicada.
20	↪ **QS-Cozinha**	**0,97**	—	—	—	—	**2550**	**691**	**702**	**161**	**2645**	**709**	**RST**	220	16 ± 6	**1,86**	Quadro secundário.
21	↪ Iluminação	1,00	0,80	0,90	—	—	400	288	0	0	400	288	**SN**	127	3 ± 1	2,27	Luminárias.
22	↪ 3×TUG	0,95	0,70	0,70	—	—	450	221	148	72	474	232	**ST**	220	4 ± 1	1,06	Carga leve.
23	↪ TUE geladeira	0,85	0,70	—	0,35	—	500	122	310	76	588	144	**RN**	127	3 ± 1	1,13	Carga cíclica.
24	↪ TUE micro-ondas	0,98	0,50	—	0,10	—	1200	60	244	12	1224	61	**TR**	220	4 ± 1	0,28	Uso intermitente.
30	↪ **QS-Garagem**	**0,98**	—	—	—	—	**500**	**233**	**99**	**35**	**510**	**236**	**RT**	220	12 ± 5	**0,62**	Quadro secundário.
31	↪ Iluminação	1,00	0,80	0,80	—	—	200	128	0	0	200	128	**TN**	127	3 ± 1	1,01	Uso eventual.
32	↪ 2×TUG	0,95	0,70	0,50	—	—	300	105	99	35	316	111	**TR**	220	5 ± 1	0,50	Carga leve.
40	↪ **QS-Bombas**	**0,81**	—	—	—	—	**2250**	**840**	**1649**	**618**	**2790**	**1043**	**RST**	220	2 ± 1	**2,74**	Quadro secundário.
41	↪ Piscina	0,80	0,80	—	0,50	—	1500	600	1125	450	1875	750	**RST**	220	2 ± 1	1,97	Motor trifásico cíclico.
42	↪ Caixa d'água	0,82	0,80	—	0,40	—	750	240	524	168	915	293	**RS**	220	1 ± 1	1,33	Motor bifásico cíclico.
50	↪ **QS-Reserva 1**	**1,00**	—	**0,50**	—	—	**800**	**400**	**0**	**0**	**800**	**400**	**RST**	220	10 ± 5	**1,05**	Sem subcircuitos.
60	↪ **QS-Reserva 2**	**1,00**	—	**0,50**	—	—	**800**	**400**	**0**	**0**	**800**	**400**	**RST**	220	10 ± 5	**1,05**	Sem subcircuitos.
	Potência instalada total:						**9000**		**3227**		**9561**						
	Soma das demandas estimadas dos quadros subordinados:							**3866**		**1288**		**4075**					
	Demanda diversificada estimada com $f_v = 1{,}15$:							**3362**		**1120**		**3543**					

Nota: Adotou-se $f_v = 1{,}15$ como premissa didática para representar a diversidade entre as demandas estimadas dos quadros subordinados.

Na Tabela 10.8, a coluna f_v é preenchida exclusivamente na linha do QGBT, permanecendo indicada por "—" nas linhas dos quadros subordinados e dos circuitos terminais. Essa distinção didática reforça que o fator de diversidade não substitui nem se sobrepõe aos fatores aplicados nos níveis inferiores da análise. O fator f_u atua sobre a potência nominal da carga; o fator f_s representa a simultaneidade entre cargas, pontos ou circuitos; o fator f_c representa o ciclo de serviço de cargas intermitentes; e o fator f_v atua no nível do QGBT, comparando a soma das demandas máximas dos quadros subordinados com a demanda máxima provável do conjunto.

Nota

Convenção do fator de diversidade: Neste capítulo, adota-se a convenção em que $f_v > 1$ reduz a soma das demandas máximas individuais para estimar a demanda máxima do conjunto. Algumas fontes didáticas e alguns procedimentos práticos utilizam diretamente um fator redutor equivalente, menor que 1, aplicado à soma das demandas. Nesses casos, trata-se da mesma ideia física, mas com convenção matemática diferente.

A Tabela 10.9 apresenta exemplos de fatores de diversidade típicos para agrupamentos de cargas. Os valores possuem caráter didático e devem ser interpretados como referência preliminar, não como substitutos de critérios normativos, dados de medição, informações da concessionária ou requisitos específicos do processo produtivo.

Tabela 10.9: Fatores de diversidade típicos para agrupamentos de cargas

Conjunto analisado	f_v **típico**	**Observação**
Dois circuitos com uso semelhante	1,05 a 1,20	Baixa diversidade entre os picos individuais.
Vários circuitos de tomadas residenciais	1,30 a 2,00	Picos de uso não sincronizados.
Setores administrativos distintos	1,10 a 1,50	Depende da ocupação e do horário de uso.
Setores industriais independentes	1,20 a 1,80	Processos assíncronos.
Motores de uma mesma linha de produção	1,00 a 1,20	Baixa diversidade se no sincronismo.
Quadros secundários de áreas distintas	1,20 a 2,00	Demanda de alimentadores aninhados.
Cargas principais e cargas reserva	1,50 a 3,00	Reserva com operação em contingências.

Em aplicações profissionais, os fatores de diversidade devem ser acompanhados de justificativa técnica. O projetista pode utilizar fatores tabelados, dados históricos de consumo, medições de demanda, curvas de carga, informações do processo produtivo, turnos de operação ou critérios exigidos pela concessionária. O mais importante é que o valor adotado seja coerente com o funcionamento esperado da instalação.

Aviso

Uso indevido de fatores: A adoção de fatores muito baixos pode causar subdimensionamento, aquecimento excessivo, atuação indevida de dispositivos de proteção e queda de tensão acima dos limites admissíveis. A adoção de fatores muito altos pode gerar superdimensionamento e aumento desnecessário de custos. Em ambos os casos, o problema não está no uso dos fatores, mas na ausência de justificativa técnica adequada.

10.2.6 Demanda equivalente

Os fatores apresentados ao longo desta seção representam fenômenos diferentes do funcionamento real de uma instalação elétrica. O fator de utilização (f_u) ajusta a potência nominal à parcela efetivamente usada; o fator de simultaneidade (f_s) representa a coincidência de funcionamento entre cargas em diferentes níveis de aninhamento; o fator de ciclo de serviço (f_c) representa a fração de tempo de operação de cargas intermitentes; e o fator de diversidade (f_v) compara demandas estimadas individuais com a demanda estimada do conjunto.

Em cálculos preliminares, é comum consolidar vários efeitos em um único fator de demanda. Nesse caso, o fator de demanda atua como um coeficiente equivalente, pois relaciona diretamente a demanda provável com a potência instalada, sem necessariamente explicitar separadamente utilização, simultaneidade, ciclo de serviço ou diversidade. Este entendimento foi apresentado na Seção 8.2.5 do Capítulo 8 como o conceito introdutório: “fator de uso”.

A Tabela 10.10 resume a função de cada fator e sua forma típica de aplicação.

Tabela 10.10: Síntese dos principais “fatores de uso” aplicados no cálculo de demanda

Fator	Símbolo	Interpretação	Uso típico
Demanda	f_d	Relação entre demanda máxima provável e potência instalada.	Síntese global para dimensionamento preliminar.
Utilização	f_u	Fração da potência nominal efetivamente utilizada.	Equipamentos operando abaixo da potência nominal.
Simultaneidade	f_s	Parcela das cargas que opera ao mesmo tempo.	Agrupamento de cargas, circuitos, quadros ou setores.
Ciclo de serviço	f_c	Fração de tempo em que a carga permanece ligada.	Bombas, compressores, máquinas intermitentes e cargas cíclicas.
Diversidade	f_v	Não coincidência entre demandas máximas individuais.	Alimentadores comuns, QGBT, setores e grupos de quadros.

Para uma grandeza de potência $\mathcal{P}$, com $\mathcal{P} \in \{P, Q, S\}$, uma forma didática de representar essa consolidação é:

$$\mathrm{f}_{d,\mathrm{eq}} = \frac{D_{\mathcal{P},\mathrm{conj}}}{\sum_{k=1}^{n} \mathcal{P}_k} \approx \frac{\displaystyle\sum_{k=1}^{n} \left(\mathcal{P}_k \cdot \mathrm{f}_{u,k} \cdot \mathrm{g}_k\right)}{\displaystyle\sum_{k=1}^{n} \mathcal{P}_k} \cdot \frac{1}{\mathrm{f}_v}, \qquad \mathrm{g}_k \in \{\mathrm{f}_{s,k}, \mathrm{f}_{c,k}\}\,, \tag{10.18}$$

onde $\mathrm{f}_{d,\mathrm{eq}}$ expressa um fator de demanda equivalente para o conjunto analisado. O termo $\mathrm{f}_{u,k}$ considera a parcela efetivamente utilizada da potência nominal da carga k; o termo g_k representa o critério operacional complementar adotado, podendo ser o fator de simultaneidade $\mathrm{f}_{s,k}$ ou o fator de ciclo de serviço $\mathrm{f}_{c,k}$; e o termo $1/\mathrm{f}_v$ representa a redução associada à diversidade entre as demandas estimadas individuais e conjuntas.

Essa equação tem função didática: mostra como o fator de demanda pode absorver diferentes efeitos em um único coeficiente. Em uma tabela, é mais claro indicar com “—” os fatores não aplicados em determinada linha; em uma expressão algébrica, eles podem ser simplesmente omitidos.

! Importante

Documentação: Os fatores adotados devem ser registrados no memorial de cálculo, com indicação de sua origem (estimativa, tabela, medição ou experiência de projeto) para permitir conferência e revisão futura.

A principal vantagem de separar os fatores é tornar explícita a origem de cada redução aplicada à potência instalada, distinguindo carregamento parcial, não simultaneidade, operação intermitente e diversidade entre máximos. Em procedimentos normativos ou estudos baseados em medições, pode ser mais apropriado utilizar diretamente um fator de demanda global, desde que sua origem e abrangência sejam conhecidas. Em qualquer caso, o fator de demanda não é um número arbitrário de redução, mas uma forma compacta de representar o comportamento provável da instalação e estabelecer a ligação entre a potência instalada e a demanda de dimensionamento.

10.2.7 Cálculo de demanda total

Após a definição dos fatores de utilização, simultaneidade, ciclo de serviço e diversidade, pode-se consolidar o cálculo da demanda total da instalação, para isto algumas caraterísticas do quadro de carga (tabela) são refatoradas. Nesta etapa, o objetivo não é introduzir um novo fator de redução, mas organizar os resultados obtidos nos níveis anteriores da análise: circuitos terminais, quadros subordinados e quadro geral.

Para manter a continuidade pedagógica, será retomado o exemplo da Tabela 10.11, condensando os conceitos do Capítulo 8, onde foi realizado o levantamento das cargas, do Capítulo 9, onde essas cargas foram organizadas em circuitos e quadros, e das seções anteriores deste capítulo, que introduziram os fatores usados para estimar a demanda provável a partir da potência instalada.

A Tabela 10.11 apresenta a consolidação do cálculo de demanda total. Nela, os fatores f_u, f_s, f_c e f_v aparecem explicitamente para evidenciar o nível em que cada critério foi aplicado. Os circuitos terminais recebem os fatores associados ao comportamento da carga; os quadros subordinados reúnem as demandas estimadas de seus circuitos internos; e o QGBT representa o nível mais agregado da instalação, no qual é aplicado o fator de diversidade.

Tabela 10.11: Cálculo da demanda total do QGBT a partir dos quadros subordinados

k	**Carga**	$\cos\phi$	f_u	f_s	f_c	P [W]	D_P [W]	Q [VAr]	D_Q [VAr]	S [VA]	D_S [VA]	$V_{\perp\!\!\!\perp}$ [V]	Δl [m]	$I_{B,\mathbf{R}}$ [A]	$I_{B,\mathbf{S}}$ [A]	$I_{B,\mathbf{T}}$ [A]	**Obs.**
00	**QGBT**	**0,95**	**—**	**—**	**—**	**9000**	**3362**	**3227**	**1120**	**9561**	**3543**	220	—	**14,03**	**10,41**	**11,01**	–
10	**QS-Sala**	**0,94**	**—**	**—**	**—**	**2100**	**1302**	**778**	**475**	**2239**	**1386**	220	8 ± 3	**5,30**	**3,10**	**4,09**	–
11	Iluminação	1,00	0,80	1,00	—	300	240	0	0	300	240	127	3 ± 1	0	1,89	0	–
12	4×TUG	0,95	0,70	0,60	—	600	252	197	83	632	265	220	4 ± 1	1,21	1,21	0	–
13	Ar-condicionado	0,90	0,75	0,90	—	1200	810	581	392	1333	900	220	1 ± 1	4,09	0	4,09	–
20	**QS-Cozinha**	**0,97**	**—**	**—**	**—**	**2550**	**691**	**702**	**161**	**2645**	**709**	220	16 ± 6	**3,33**	**1,41**	**1,34**	–
21	Iluminação	1,00	0,80	0,90	—	400	288	0	0	400	288	127	3 ± 1	2,27	0	0	–
22	3×TUG	0,95	0,70	0,70	—	450	221	148	72	474	232	220	4 ± 1	1,06	0	1,06	–
23	TUE geladeira	0,85	0,70	—	0,35	500	122	310	76	588	144	127	3 ± 1	0	1,13	0	–
24	TUE micro-ondas	0,98	0,50	—	0,10	1200	60	244	12	1224	61	220	4 ± 1	0	0,28	0,28	–
30	**QS-Garagem**	**0,98**	**—**	**—**	**—**	**500**	**233**	**99**	**35**	**510**	**236**	220	12 ± 5	**0**	**0,50**	**1,51**	–
31	Iluminação	1,00	0,80	0,80	—	200	128	0	0	200	128	127	3 ± 1	0	0	1,01	–
32	2×TUG	0,95	0,70	0,50	—	300	105	99	35	316	111	220	5 ± 1	0	0,50	0,50	–
40	**QS-Bombas**	**0,81**	**—**	**—**	**—**	**2250**	**840**	**1649**	**618**	**2790**	**1043**	220	2 ± 1	**3,30**	**3,30**	**1,97**	–
41	Piscina	0,80	0,80	—	0,50	1500	600	1125	450	1875	750	220	2 ± 1	1,97	1,97	1,97	–
42	Caixa d'água	0,82	0,80	—	0,40	750	240	524	168	915	293	220	1 ± 1	1,33	1,33	0	–
50	**QS-Reserva 1**	**1,00**	**—**	**0,50**	**—**	**800**	**400**	**0**	**0**	**800**	**400**	220	10 ± 5	**1,05**	**1,05**	**1,05**	–
60	**QS-Reserva 2**	**1,00**	**—**	**0,50**	**—**	**800**	**400**	**0**	**0**	**800**	**400**	220	10 ± 5	**1,05**	**1,05**	**1,05**	–
	Potência instalada e demanda estimada total:					**9000**	**3866**	**3227**	**1288**	**9561**	**4075**						
	Demanda diversificada estimada com $\mathrm{f}_v = 1{,}15$:					—	**3362**	—	**1120**	—	**3543**						
													Corrente de demanda:	**14,03**	**10,41**	**11,01**	

Nota: As correntes $I_{B,\mathbf{R}}$, $I_{B,\mathbf{S}}$ e $I_{B,\mathbf{T}}$ foram distribuídas conforme as fases solicitadas por cada carga. Nos quadros subordinados, elas resultam da soma das correntes dos circuitos terminais por fase. Note que no QGBT, não se pressupõe balanceamento perfeito.

Considerando uma alimentação trifásica equilibrada no QGBT, seria possível utilizar diretamente a Equação 10.6. Nesse caso, a corrente equivalente associada à demanda aparente diversificada seria:

$$I_D = \frac{D_{S,\mathrm{QGBT}}}{\sqrt{3}\,V_L} = \frac{3543}{\sqrt{3}\cdot 220} \approx 9{,}30\,[\mathrm{A}]. \tag{10.19}$$

Esse resultado corresponde à corrente de demanda para uma condição trifásica equilibrada; entretanto, a Tabela 10.11 apresenta uma distribuição fora do equilíbrio. Assim, a corrente de demanda do QGBT deve ser verificada também a partir das correntes efetivamente distribuídas entre as fases:

$$I_{D,\mathrm{QGBT}} = \max\left\{I_{B,\mathbf{R}}, I_{B,\mathbf{S}}, I_{B,\mathbf{T}}\right\}, \tag{10.20}$$

onde, substituido os valores disponíveis na Tabela 10.11, obtém-se: $I_{D,\mathrm{QGBT}} = 14{,}03\,[\mathrm{A}]$.

Observa-se que esse valor é maior que a corrente calculada pela Equação 10.19. Isso ocorre, em parte, porque a Equação 10.19 as correntes por fase apresentadas na tabela foram obtidas pela soma das solicitações dos quadros subordinados em cada fase, sem aplicar diretamente o fator de diversidade a cada corrente de fase.

Para comparação, se o fator de diversidade não fosse considerado na potência aparente total, a corrente equivalente em condição trifásica equilibrada seria:

$$I_D = \frac{4075}{\sqrt{3} \cdot 220} \approx 10{,}69\,[\mathrm{A}]. \tag{10.21}$$

Mesmo nesse caso, a corrente equivalente equilibrada ainda seria menor que a maior corrente por fase indicada na Tabela 10.11. Esse resultado reforça a necessidade de verificar as correntes por fase quando a instalação apresenta distribuição não equilibrada de cargas. Este procedimento de verificação é válido para um QGBT alimentado por uma, duas ou três fases.

Na prática, uma instalação perfeitamente equilibrada é difícil de obter e de manter ao longo do tempo, pois os hábitos de uso, a ligação de cargas monofásicas, a operação de equipamentos intermitentes e futuras ampliações podem alterar a distribuição das correntes. Assim, para fins de dimensionamento preliminar dos condutores e dispositivos de proteção do QGBT, a adoção da maior corrente de fase constitui um critério mais conservador e mais seguro do que o uso exclusivo da expressão trifásica equilibrada.

Definição

Corrente de demanda total: Define-se corrente de demanda total como a corrente elétrica associada à demanda estimada do conjunto analisado. No caso do QGBT, essa corrente é utilizada como referência inicial para o dimensionamento da alimentação principal, dos condutores alimentadores e do dispositivo geral de proteção.

Adicionalmente, com a informação provista pela Tabela 10.11, é possível calcular um fator de demanda equivalente para a instalação ($\mathrm{f}_{d,\mathrm{eq}}$), que não constitui um novo critério, mas a síntese dos efeitos já considerados no cálculo. Para a potência aparente, por exemplo, há $9561\,[\mathrm{VA}]$ instalados no QGBT e uma demanda diversificada de $3543\,[\mathrm{VA}]$, resultando em um fator de aproximadamente $0{,}37$, o que indica que a demanda corresponde é cerca de $37\,\%$ da potência instalada. Essa porcentagem, porém, não deve ser generalizada, pois depende diretamente das premissas adotadas para os fatores de utilização, simultaneidade, ciclo de serviço e diversidade.

O valor da demanda total constitui parâmetro fundamental para diversas decisões de projeto, incluindo:

- Dimensionamento do dispositivo geral de proteção;
- Seleção dos condutores alimentadores;
- Definição da capacidade do quadro geral;
- Verificação da viabilidade de atendimento pela concessionária;
- Avaliação de margem para futuras ampliações.

Além desses usos, a demanda estimada auxilia na verificação da reserva técnica da instalação. Quando houver previsão de ampliação, aumento de cargas ou instalação de novos equipamentos, deve-se avaliar se a entrada de serviço, o QGBT e os alimentadores possuem margem adequada para esse crescimento.

Em projetos industriais, o cálculo de demanda total deve considerar as características do processo, como regime de operação dos motores, partidas de compressores, sequências produtivas, cargas intermitentes, equipamentos reserva e turnos de funcionamento. Sempre que disponíveis, medições, históricos de consumo e dados reais de operação devem ser utilizados para melhorar a estimativa. Na ausência desses dados, devem ser adotadas premissas conservadoras e tecnicamente justificáveis.

10.3 Resumo do capítulo

Neste capítulo, foi apresentado o cálculo de demanda como etapa intermediária entre o levantamento de cargas, o quadro de cargas e o dimensionamento dos componentes principais da instalação elétrica. A potência instalada foi tratada como ponto de partida do estudo, enquanto a demanda estimada foi associada à condição provável de operação das cargas, considerando que nem todos os equipamentos operam simultaneamente, em plena potência e durante o mesmo intervalo.

Foram estudados o fator de demanda f_d, o fator de utilização f_u, o fator de simultaneidade f_s, o fator de ciclo de serviço f_c e o fator de diversidade f_v. Mostrou-se que esses fatores representam efeitos distintos: uso parcial da potência nominal, coincidência de funcionamento, operação intermitente e diversidade entre agrupamentos. Também foi destacado que o fator de demanda pode atuar como coeficiente equivalente, absorvendo diferentes efeitos em um único valor quando essa convenção for adotada.

Ao longo do capítulo, foi ressaltada a importância de aplicar cada fator no nível correto de análise. O fator de utilização foi associado principalmente às cargas ou circuitos terminais; o fator de simultaneidade, à coincidência de funcionamento entre pontos, circuitos ou agrupamentos; o fator de ciclo de serviço, às cargas cíclicas ou intermitentes; e o fator de diversidade, ao nível mais agregado da instalação, como quadros subordinados, setores ou QGBT. Essa separação evita dupla redução da demanda e melhora a rastreabilidade das premissas adotadas.

O exemplo desenvolvido permitiu acompanhar a aplicação progressiva desses fatores em circuitos terminais, quadros subordinados e QGBT. Na consolidação final, a demanda diversificada estimada do QGBT foi obtida a partir das demandas dos quadros subordinados, considerando um fator de diversidade com caráter didático. Também foi mostrado que, em instalações desequilibradas, a corrente de demanda deve ser verificada por fase, adotando-se a maior corrente calculada como referência preliminar para o dimensionamento.

Conclui-se que o cálculo de demanda não deve ser entendido como simples redução aritmética da potência instalada, mas como uma interpretação técnica do comportamento provável da instalação. A escolha dos fatores deve ser justificada no memorial de cálculo, com base em normas aplicáveis, dados de fabricante, medições, histórico de operação, critérios da concessionária e características reais do processo ou da edificação. Dessa forma, o cálculo de demanda contribui para um projeto mais seguro, tecnicamente coerente e economicamente equilibrado.

Parte III

Dimensionamento e documentação técnica

Capítulo 11

Dimensionamento de condutores

11.1 Introdução

O dimensionamento de condutores elétricos é uma das etapas centrais de um projeto de instalação elétrica de baixa tensão. O condutor deve transportar a corrente elétrica prevista para o circuito sem ultrapassar os limites térmicos da isolação, sem produzir queda de potencial elétrico excessiva e sem perder a coordenação com os dispositivos de proteção. Quando esses critérios não são atendidos, podem ocorrer aquecimento indevido, degradação da isolação, desligamentos não desejados, mau funcionamento das cargas e, em situações críticas, risco de choque elétrico ou incêndio, comprometendo a segurança e a confiabilidade da instalação.

Nos capítulos anteriores, foram realizados o levantamento de cargas, a organização dos circuitos no quadro de cargas e o cálculo da demanda da instalação. A partir dessas informações, torna-se possível determinar a corrente de projeto dos circuitos e, em seguida, selecionar a seção dos condutores. Essa seleção, entretanto, não deve ser feita apenas pela corrente nominal da carga. Devem ser considerados também o método de instalação, a temperatura ambiente, o agrupamento de circuitos, a queda de potencial elétrico admissível, a proteção contra sobrecargas e curtos-circuitos e a seção mínima permitida pela norma aplicável.

A **ABNT NBR 5410** estabelece critérios para instalações elétricas de baixa tensão e deve ser utilizada como referência principal em projetos residenciais, comerciais e industriais de baixa tensão. Quando a instalação possuir características especiais, também podem ser aplicáveis normas complementares, requisitos da concessionária, instruções de fabricantes e regulamentos de segurança específicos.

! Importante

Função do condutor: Neste capítulo, o termo “condutor” designa exclusivamente os condutores elétricos empregados em instalações de baixa tensão, constituídos por ligas metálicas adequadas ao uso elétrico, como cobre ou alumínio. Sua função é transportar corrente elétrica de forma contínua e segura, sem provocar aquecimento excessivo, queda de potencial elétrico incompatível com a carga ou perda de coordenação com os dispositivos de proteção. A seção final adotada deve atender simultaneamente aos critérios térmicos, elétricos, mecânicos e normativos, considerando o material condutor, a isolação e as condições reais de instalação.

O objetivo deste capítulo é apresentar o procedimento básico de dimensionamento de condutores em instalações de baixa tensão. Serão estudados o critério da capacidade de condução de corrente, os fatores de correção, a coordenação com dispositivos de proteção, o critério da queda de potencial elétrico, a seção mínima dos condutores e o dimensionamento do condutor de proteção **PE**.

11.2 Desenvolvimento teórico

O dimensionamento de condutores não depende de um único cálculo isolado. Em uma instalação real, a seção do condutor deve ser escolhida de modo que satisfaça, ao mesmo tempo, diferentes exigências técnicas. Entre os critérios mais importantes, destacam-se:

- **Capacidade de condução:** o condutor deve suportar a corrente elétrica de projeto sem ultrapassar sua temperatura máxima admissível. Por exemplo, um cabo embutido não deve aquecer além do permitido pela isolação;
- **Fatores de correção:** as condições reais de instalação devem ser consideradas e compensadas. Temperatura ambiente e agrupamento de circuitos, entre outros, devem ser aplicadas à corrente admissível do condutor;
- **Coordenação com a proteção:** o dispositivo de proteção deve proteger o condutor contra sobrecorrentes. Assim, um disjuntor termomagnético apropriado (dimensionamento por meio de curva de atuação) não deve permitir que o cabo seja submetido, por tempo prolongado, a uma corrente superior à sua capacidade admissível;
- **Queda de potencial elétrico:** a diferença de potencial elétrico disponível na carga deve permanecer dentro de limites aceitáveis. Em situações práticas, circuitos longos exigem condutores de maior seção;
- **Seção mínima normativa:** a seção escolhida (área transversal efetiva do condutor) não pode ser inferior à seção mínima exigida para o tipo de circuito (exigência normativa), mesmo que a corrente calculada seja pequena. Alguns circuitos possuem seções mínimas definidas por critérios térmicos ou mecânicos;
- **Condutor de proteção:** o condutor **PE** (do inglês *Protective Earth*, terra de proteção, associado à proteção elétrica e aterramento) deve possuir seção compatível com o condutor de fase e com as condições de proteção contra choques elétricos.

A seção final do condutor deve ser a maior seção resultante entre os critérios aplicáveis. Assim, mesmo que um circuito apresente corrente reduzida, a seção pode ser definida por queda de potencial elétrico, por seção mínima normativa ou por coordenação com a proteção. Este entendimento é esquematizado na Figura 11.1.

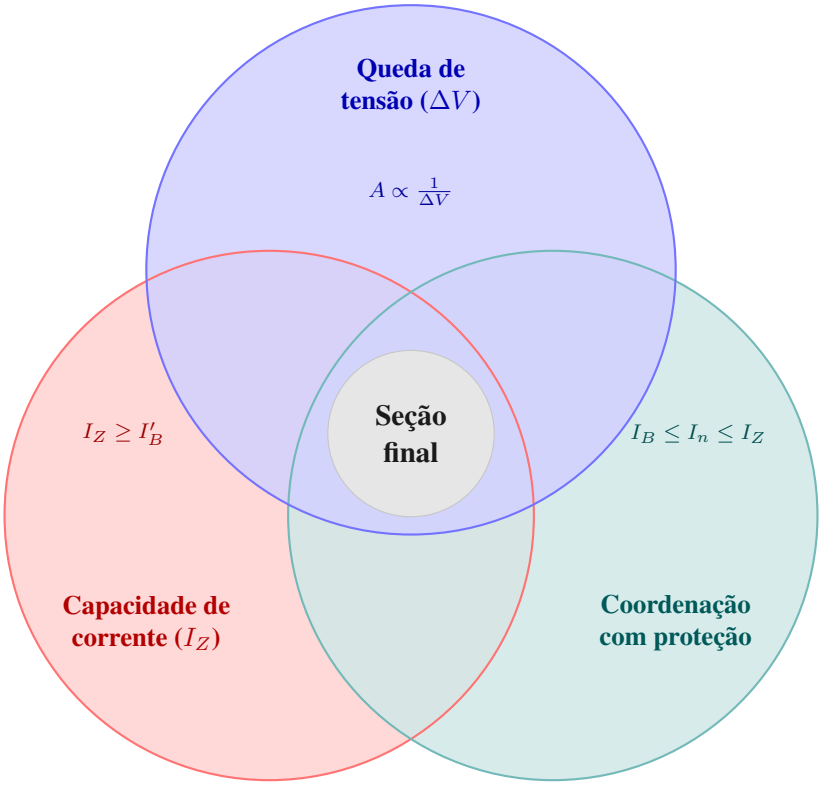

Figura 11.1: Diagrama de Venn que esquematiza os critérios principais de dimensionamento de condutores: capacidade de condução de corrente, queda de potencial elétrico admissível e coordenação com o dispositivo de proteção. A seção final deve atender simultaneamente a todos os critérios aplicáveis.

Importante

Critério simultâneo: A seção final do condutor deve atender a todos os critérios de dimensionamento. Quando critérios diferentes conduzirem a seções diferentes, deve-se adotar a maior seção resultante, desde que também sejam respeitadas as seções mínimas normativas e a compatibilidade com os dispositivos de proteção.

11.2.1 Corrente de projeto

A corrente de projeto, representada por I_B, é a corrente elétrica prevista para um circuito em condição normal de operação. Essa grandeza deve ser obtida a partir das informações dos quadros de cargas apresentados no Capítulo 10, como, por exemplo, na Tabela 10.11. O valor de I_B, assumindo a condição ideal de equilíbrio de fases ou, quando aplicável, a condição "$\max\{I_{B,\mathbf{R}}, I_{B,\mathbf{S}}, I_{B,\mathbf{T}}\}$" por agrupamento, constitui o ponto de partida para o dimensionamento dos condutores e dos dispositivos de proteção.

De forma resumida, de acordo com o que foi tratado nos anteriores capítulos:

- Para circuitos **monofásicos** ou **bifásicos**, a corrente é calculada pela Equação 10.5. Quando a potência ativa e o fator de potência são conhecidos, pode-se escrever:

$$I_B = \frac{D_P}{V_F \cdot \cos\phi}, \tag{11.1}$$

  onde D_P é a demanda ativa [W], V_F é a diferença de potencial elétrico de fase (fase-fase ou fase-neutro), em [V], e $\cos\phi$ é o fator de potência do circuito terminal ou da carga equivalente ao agrupamento de circuitos.
- Para circuitos **trifásicos equilibrados**, utiliza-se a Equação 10.6, ou, em termos de potência ativa:

$$I_B = \frac{D_P}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\phi} = \frac{D_P}{3 \cdot V_F \cdot \cos\phi}, \tag{11.2}$$

  em que $V_L = \sqrt{3} \cdot V_F$ é a diferença de potencial de linha [V] (Equação 3.8) em uma conexão estrela (⅄). No caso de um circuito **trifásico desequilibrado** usa-se a corrente máxima entre as fases, conforme a Equação 10.20.

Nota

Origem da corrente de projeto: A corrente de projeto deve ser calculada com base na potência efetivamente considerada para o dimensionamento. Em circuitos terminais, essa potência pode corresponder à carga nominal ou à demanda estimada do circuito. Em alimentadores, quadros e QGBT, a corrente deve ser compatível com a demanda consolidada do agrupamento alimentado tendo aplicado os "fatores de uso" correspondentes.

Desambiguação

Isolação e isolamento: No contexto elétrico, os termos *isolação* e *isolamento* são próximos, mas podem receber ênfases diferentes. A palavra *isolação* costuma ser usada para indicar o material isolante ou a camada aplicada diretamente ao condutor, como a isolação de PVC ou XLPE de um cabo. Já *isolamento* possui sentido mais amplo, podendo indicar a condição, o sistema ou o efeito de separar eletricamente partes condutoras entre si ou em relação à terra.

Neste livro, adota-se preferencialmente o termo *isolamento*, por ser a forma mais geral e usual no português técnico do Brasil. O termo *isolação* poderá aparecer apenas quando se desejar destacar a camada isolante específica de um condutor ou quando a nomenclatura técnica da fonte consultada assim o exigir.

11.2.2 Critério da capacidade de condução de corrente

A capacidade de condução de corrente elétrica de um condutor está relacionada ao seu limite térmico de operação. Como discutido na Seção 4.2.2 (efeito Joule). Esse aquecimento depende da resistência elétrica do condutor, da corrente eficaz e das condições de dissipação de calor. Se a temperatura do condutor ultrapassar o limite admissível da isolação, ocorre degradação progressiva do material isolante, redução da vida útil do cabo e aumento do risco de falha elétrica. Por isso, cada condutor possui uma capacidade máxima de condução de corrente.

Definição

Capacidade de condução de corrente: Na nomenclatura adotada pela **ABNT NBR 5410**, a **capacidade de condução de corrente**, representada por I_Z, corresponde à corrente máxima que um condutor pode transportar continuamente, nas condições previstas para sua instalação, sem ultrapassar a temperatura limite admissível do seu isolamento. Esse valor depende da seção nominal, do material condutor, do tipo de isolamento e isolação, do método de instalação, da temperatura ambiente e dos fatores de correção aplicáveis (ABNT NBR 5410, 2004).

Nota

Método de instalação: Indica a forma como os condutores são instalados fisicamente na edificação ou no ambiente industrial. Considera, por exemplo, se os cabos estão em eletrodutos embutidos, eletrodutos aparentes, eletrocalhas, bandejas, leitos, diretamente enterrados ou instalados ao ar livre.

Esse aspecto é importante porque a capacidade de dissipação de calor do condutor depende do meio ao seu redor. Um cabo instalado ao ar livre tende a dissipar calor de maneira diferente de um cabo instalado em eletroduto embutido, agrupado com outros circuitos ou enterrado no solo.

Em tabelas normativas I_Z é fornecido para condições de referência. Entretanto, em uma instalação real, essas condições podem ser diferentes. Temperatura elevada, agrupamento de circuitos, eletrodutos e eletrocalhas com muitos cabos e baixa ventilação reduzem a capacidade de dissipação de calor do condutor. Para considerar essas diferenças, aplicam-se fatores de correção. De forma simplificada, a corrente corrigida pode ser escrita como:

$$I'_B = \frac{I_B}{\mathrm{f}_t \cdot \mathrm{f}_g}, \tag{11.3}$$

onde:

- I'_B é a "corrente equivalente para consulta à tabela" ou "corrente corrigida de seleção" [A];
- I_B é a corrente de projeto do circuito [A];
- f_t é o fator de correção por temperatura ambiente;
- f_g é o fator de correção por agrupamento de circuitos.

O condutor selecionado deve apresentar capacidade de condução de corrente suficiente para atender:

$$I_Z \geq I'_B. \tag{11.4}$$

Nota

Interpretação física dos fatores de correção: Os fatores de correção aparecem no denominador da Equação 11.3. Quando a condição de instalação é desfavorável, esses fatores são menores que 1, fazendo com que I'_B seja maior que I_B. Isso significa que o condutor deve ser escolhido como se estivesse submetido a uma corrente mais elevada, compensando a menor capacidade de dissipação de calor.

Exemplo

Motor elétrico: Aplicando o critério de correção da Equação 11.3, a um motor elétrico arbitrário, com corrente de projeto: $I_B = 4{,}9\,[\mathrm{A}]$, considere:

- Fator de correção por temperatura: $\mathrm{f}_t = 0{,}94$;
- Fator de correção por agrupamento: $\mathrm{f}_g = 0{,}70$.

A corrente corrigida é:

$$I'_B = \frac{4{,}9}{0{,}94 \cdot 0{,}70} \approx 7{,}4\,[\mathrm{A}]. \tag{11.5}$$

O resultado indica que o condutor deve ser selecionado em tabela de capacidade de condução de corrente como se precisasse suportar, nas condições corrigidas, pelo menos $7{,}4\,[\mathrm{A}]$.

11.2.3 Fatores de correção

Os fatores de correção ajustam o dimensionamento às condições reais de instalação. Em estudos preliminares, dois fatores são particularmente importantes: a correção por temperatura ambiente e a correção por agrupamento de circuitos. Entretanto, em projetos mais completos, outros efeitos também podem ser relevantes, dependendo do método de instalação, do tipo de linha elétrica e das características das cargas alimentadas.

- O **fator de correção por temperatura**, f_t, considera que a capacidade de dissipação de calor do condutor diminui quando a temperatura ambiente aumenta. Quanto maior a temperatura ao redor do cabo, menor será a margem térmica disponível entre a temperatura ambiente e a temperatura máxima admissível do isolamento.
- O **fator de correção por agrupamento**, f_g, considera o aquecimento mútuo entre circuitos instalados no mesmo eletroduto, eletrocalha, bandeja ou feixe de cabos. Quanto maior o número de circuitos agrupados, menor tende a ser a capacidade individual de dissipação de calor de cada condutor.
- O **fator de correção associado à resistividade térmica do solo**, representado aqui por $\mathrm{f}_{\rho s}$, pode ser necessário em linhas subterrâneas. Solos secos, compactados ou com baixa capacidade de dissipação térmica dificultam a transferência de calor do cabo para o ambiente, reduzindo sua capacidade de condução de corrente.
- O **fator de correção associado a correntes harmônicas**, representado aqui por f_h, necessário em circuitos que alimentam cargas altamente não lineares. O condutor neutro pode conduzir correntes significativas, especialmente harmônicas de terceira ordem e seus múltiplos, exigindo dimensionamento específico.

Existem ainda outros fatores de correção, pertencentes a contextos mais específicos e que não serão abordados neste capítulo. Entre eles, destacam-se:

- **Fator de correção por profundidade de instalação:** para cabos enterrados, quanto maior a profundidade, menor a dissipação térmica em direção à superfície.
- **Fator de correção para múltiplos circuitos enterrados:** análogo ao agrupamento, aplicado a dutos ou cabos dispostos em vala comum.
- **Fator de correção por radiação solar:** aplicável a cabos instalados externamente e expostos à irradiação direta, como em sistemas fotovoltaicos.
- **Fator de carga cíclica:** quando a carga não é contínua, a inércia térmica do condutor pode ser aproveitada, permitindo a aplicação de um fator superior à unidade.
- **Efeito pelicular e de proximidade:** para grandes seções transversais, a resistência efetiva do condutor aumenta em corrente alternada, devendo ser considerada no dimensionamento.
- **Fator de altitude:** o ar rarefeito em grandes altitudes reduz o resfriamento convectivo de cabos instalados a céu aberto. Neste caso, maiores seções e ausência de isolação são padrões de instalação.

Nota

Tabela normativa: Além desses fatores, o método de instalação, o número de condutores carregados, o material condutor, o tipo de isolamento e a forma de disposição dos cabos também influenciam a capacidade de condução de corrente. Em geral, esses aspectos não aparecem como fatores multiplicativos isolados, mas como parâmetros usados na escolha da tabela normativa adequada para determinar I_Z.

A Tabela 11.1 apresenta valores típicos de fator de correção por temperatura ambiente. Esses valores devem ser escolhidos conforme o tipo de isolamento do cabo e a temperatura real do local de instalação.

Tabela 11.1: Fator de correção por temperatura ambiente

T_{amb} [°C]	PVC	EPR/XLPE	Observação
10	1,22	1,15	Condição mais favorável que a referência usual de 30 °C para linhas não subterrâneas.
20	1,12	1,08	Temperatura ambiente inferior à referência, permitindo maior dissipação térmica.
30	1,00	1,00	Condição de referência didática para linhas não subterrâneas.
40	0,87	0,91	Temperatura ambiente elevada; a capacidade de condução deve ser reduzida.
50	0,71	0,82	Exige atenção especial à escolha da seção e ao tipo de isolamento do cabo.

Nota: T_{amb} é a temperatura ambiente considerada para a instalação dos condutores; note que a referência é 30 °C e não 25 °C como em outros contextos. Os valores são apresentados com finalidade didática.

A isolação em PVC é usual em instalações de baixa tensão de uso geral, por ser econômica, amplamente disponível e adequada a condições comuns de temperatura e instalação, desde que respeitados seus limites térmicos. A isolação em EPR é indicada quando se deseja maior flexibilidade, melhor desempenho em ambientes úmidos ou condições mais severas de serviço, sendo frequente em cabos que exigem comportamento elastomérico e boa resistência térmica. Já a isolação em XLPE é apropriada para aplicações que exigem maior estabilidade térmica, boa rigidez dielétrica e melhor desempenho em correntes mais elevadas, especialmente quando o método de instalação ou o agrupamento de circuitos impõe maior solicitação térmica ao cabo.

Nota

Isolação em PVC: O policloreto de vinila é um material polimérico termoplástico muito utilizado como isolação de condutores elétricos em instalações de baixa tensão. Sua unidade repetitiva deriva do monômero cloreto de vinila, cuja polimerização pode ser representada, de forma simplificada, por:

$$n\,\mathrm{CH_2{=}CHCl} \longrightarrow [-\mathrm{CH_2{-}CHCl}-]_n. \tag{11.6}$$

A presença do átomo de cloro na cadeia polimérica torna o PVC mais polar que hidrocarbonetos simples, contribuindo para suas propriedades dielétricas e para sua resistência à propagação de chama. De forma esquemática, a estrutura repetitiva pode ser associada ao grupo:

$$[-\mathrm{CH_2{-}CHCl}-]_n. \tag{11.7}$$

Do ponto de vista térmico, o PVC é adequado para muitas instalações usuais, mas apresenta limitação de temperatura em comparação com isolações como EPR ou XLPE. Em temperaturas elevadas ou em condições severas de sobreaquecimento, pode ocorrer degradação do material, com eliminação de ácido clorídrico:

$$[-\mathrm{CH_2{-}CHCl}-]_n \xrightarrow{\Delta} [-\mathrm{CH{=}CH}-]_n + n\,\mathrm{HCl}. \tag{11.8}$$

Por isso, ao selecionar um condutor com isolação em PVC, deve-se verificar a temperatura admissível do cabo, o método de instalação, a temperatura ambiente, o agrupamento de circuitos e os fatores de correção aplicáveis. Em termos práticos, o PVC é uma solução comum e econômica, mas sua capacidade de condução de corrente deve sempre ser avaliada dentro das condições reais de dissipação térmica da instalação.

Nota

Isolação em EPR: Do inglês *ethylene-propylene rubber*, o EPR é uma borracha sintética formada principalmente pela copolimerização de etileno e propileno. De forma esquemática, sua formação pode ser representada por:

$$n\,\mathrm{CH_2{=}CH_2} + m\,\mathrm{CH_2{=}CH{-}CH_3} \longrightarrow [-\mathrm{CH_2{-}CH_2}-]_n[-\mathrm{CH_2{-}CH(CH_3)}-]_m. \tag{11.9}$$

Diferentemente do PVC, o EPR não possui átomos de cloro na cadeia principal. Sua estrutura é predominantemente hidrocarbônica, com cadeias flexíveis e comportamento elastomérico. Em aplicações como isolação de cabos, o material é reticulado, isto é, suas cadeias poliméricas são ligadas entre si por pontes químicas. De forma simplificada, a reticulação pode ser representada por:

$$\mathrm{P^{\bullet}} + {}^{\bullet}\mathrm{P} \longrightarrow \mathrm{P{-}P}, \tag{11.10}$$

em que $\mathrm{P^{\bullet}}$ representa uma cadeia polimérica com um elétron desemparelhado, isto é, uma cadeia radicalar, e $\mathrm{P{-}P}$ representa uma ligação química formada entre duas cadeias.
Essa rede reticulada melhora a estabilidade térmica e mecânica do material, permitindo que o EPR suporte temperaturas de operação superiores às de muitas isolações termoplásticas comuns. Além disso, sua flexibilidade e sua boa resistência à umidade tornam esse material adequado para condutores submetidos a condições mais severas de instalação.

No dimensionamento elétrico, a escolha de um cabo com isolação em EPR deve considerar a temperatura admissível do condutor, o método de instalação, a temperatura ambiente, o agrupamento de circuitos e os fatores de correção aplicáveis. A composição final do cabo também depende de aditivos, cargas minerais, sistema de reticulação e cobertura externa especificados pelo fabricante.

Nota

Isolação em XLPE: Do inglês *cross-linked polyethylene*, o XLPE é o polietileno reticulado. Sua base química é o polietileno, obtido pela polimerização do etileno:

$$n\,\mathrm{CH_2{=}CH_2} \longrightarrow [-\mathrm{CH_2{-}CH_2}-]_n. \tag{11.11}$$

No polietileno comum, as cadeias poliméricas são essencialmente lineares ou ramificadas, apresentando comportamento termoplástico. No XLPE, essas cadeias passam por um processo de reticulação, formando ligações químicas entre macromoléculas vizinhas. De forma simplificada, esse processo pode ser representado por:

$$\mathrm{P{-}H} \xrightarrow{\Delta,\ \text{peróxido}} \mathrm{P^{\bullet}}. \tag{11.12}$$

$$\mathrm{P^{\bullet}} + {}^{\bullet}\mathrm{P} \longrightarrow \mathrm{P{-}P}. \tag{11.13}$$

Nessa representação, $\mathrm{P^{\bullet}}$ indica uma cadeia polimérica radicalar, isto é, uma cadeia com elétron desemparelhado. A ligação $\mathrm{P{-}P}$ representa uma ponte entre cadeias de polietileno. Essa rede tridimensional reduz o escoamento do material em temperaturas elevadas e aumenta sua estabilidade térmica em comparação com o polietileno termoplástico. Por isso, o XLPE é amplamente utilizado como isolação de condutores em instalações de baixa e média tensão.
Do ponto de vista elétrico, o XLPE apresenta boas propriedades dielétricas e baixa polaridade, pois sua cadeia é formada essencialmente por ligações entre carbono e hidrogênio:

$$[-\mathrm{CH_2{-}CH_2}-]_n. \tag{11.14}$$

Em termos práticos, cabos com isolação em XLPE tendem a suportar temperaturas de operação mais elevadas que cabos com isolação em PVC, desde que respeitadas as condições especificadas pelo fabricante e pelas tabelas normativas aplicáveis. O comportamento frente à chama, à emissão de fumaça e à agressividade dos gases liberados depende da formulação completa do cabo, incluindo cobertura, aditivos e classificação construtiva.
Assim como nos demais tipos de isolação, a capacidade de condução de corrente de um cabo XLPE deve ser avaliada considerando o método de instalação, a temperatura ambiente, o agrupamento de circuitos, a ventilação, a presença de linhas subterrâneas e os fatores de correção aplicáveis.

A Tabela 11.2 apresenta valores típicos do fator de correção por agrupamento de circuitos, aplicável quando dois ou mais circuitos compartilham o mesmo percurso. Os valores cobrem até seis circuitos por percurso; para agrupamentos maiores, recomenda-se consultar diretamente a tabela normativa aplicável.

Tabela 11.2: Fator de correção por agrupamento de circuitos

n	f_g	**Interpretação prática**
1	1,00	Circuito isolado no percurso; não há redução por aquecimento mútuo entre circuitos.
2	0,80	Dois circuitos no mesmo eletroduto, eletrocalha ou feixe de cabos; já há redução relevante da dissipação térmica.
3	0,70	Condição adotada no exemplo inicial, na Equação 11.5, representando três circuitos carregados agrupados.
4	0,65	Agrupamento mais severo, exigindo maior atenção à corrente corrigida e à seção selecionada.
5	0,60	Situação comum em eletrocalhas ou quadros com vários circuitos seguindo pelo mesmo percurso.
6	0,57	O aquecimento mútuo passa a ser significativo, podendo impor aumento de seção.

Nota: Neste caso n representa o número de circuitos efetivamente carregados e agrupados no mesmo percurso. Os fatores indicados são valores típicos para estudos preliminares. Em projeto normativo, o fator de agrupamento deve ser obtido na tabela aplicável da ABNT NBR 5410, considerando a forma de agrupamento, o método de instalação e o número de circuitos efetivamente carregados.

Desambiguação

Agrupamento, percurso e circuitos efetivamente carregados: No dimensionamento térmico dos condutores, alguns termos são próximos, mas não equivalentes. A distinção é importante porque o fator de agrupamento deve representar a condição real de dissipação de calor dos cabos.

- **Agrupamento de circuitos:** ocorre quando dois ou mais circuitos compartilham uma mesma condição térmica de instalação, de modo que o calor produzido por um circuito interfere na dissipação de calor dos demais. O agrupamento não depende apenas de os circuitos pertencerem ao mesmo quadro, mas de estarem próximos ao longo de um trecho comum da instalação.
- **Circuito efetivamente carregado:** é o circuito que, na condição analisada de operação, conduz corrente suficiente para contribuir para o aquecimento do agrupamento. Circuitos reserva, desenergizados ou com carregamento desprezível não devem ser contados da mesma forma que circuitos em operação contínua ou simultânea, salvo quando forem previstos como cargas futuras efetivas.

Mesmo percurso: indica que os circuitos seguem juntos por uma parte do trajeto físico da instalação. Por exemplo, dois ou mais circuitos podem sair do mesmo quadro e percorrer o mesmo eletroduto, a mesma eletrocalha ou o mesmo feixe de cabos durante certo comprimento. Se depois se separam, o agrupamento deve ser avaliado no trecho comum mais desfavorável. Todos os trechos comuns devem ser avaliados. Alguns exemplos podem ser citados:

- **Eletroduto:** é uma infraestrutura fechada, geralmente tubular, destinada à passagem e proteção dos condutores. Em linguagem informal, especialmente em obras, o eletroduto também pode ser chamado de *conduite*. Quando vários circuitos passam pelo mesmo eletroduto, a ventilação é limitada e o aquecimento mútuo tende a ser mais relevante.
- **Eletrocalha:** é uma infraestrutura em forma de canaleta, aberta ou fechada, usada para acomodar e organizar cabos. A dissipação térmica depende da ventilação, da quantidade de cabos, da disposição dos condutores e do grau de ocupação da eletrocalha.
- **Feixe de cabos:** é um conjunto de cabos instalados próximos entre si, muitas vezes amarrados ou justapostos, sem espaçamento suficiente para dissipação térmica independente. Mesmo fora de eletrodutos ou eletrocalhas, um feixe pode caracterizar agrupamento térmico. Em alguns casos este arranjo está dentro de *shafts*.
- **Canaleta:** é uma infraestrutura em forma de canal, geralmente usada para acomodar e proteger condutores em instalações aparentes ou de menor porte; dependendo do contexto pode ser chamada “perfilado” ou simplesmente “conduto”. Pode ser metálica ou plástica, aberta ou com tampa, dependendo da aplicação.
- **Bandeja ou leito para cabos:** são estruturas abertas destinadas ao suporte de cabos, muito comuns em instalações industriais. Por permitirem maior ventilação que eletrodutos fechados, podem favorecer a dissipação de calor, desde que a disposição e o agrupamento dos cabos sejam adequados.

O fator de correção por agrupamento pode ser dispensado quando o circuito percorre sozinho a infraestrutura, quando os demais circuitos próximos não estão efetivamente carregados ou quando os percursos são termicamente independentes. Contudo, sempre que circuitos carregados compartilham eletroduto, eletrocalha, bandeja ou feixe de cabos por um percurso relevante, o fator deve ser avaliado, pois o aquecimento mútuo reduz a capacidade de condução de corrente dos condutores.

A Tabela 11.3 apresenta fatores associados à resistividade térmica do solo, aplicáveis principalmente a cabos enterrados. Esse critério é importante porque a dissipação de calor em linhas subterrâneas depende fortemente das características térmicas do solo ao redor dos condutores.

Tabela 11.3: Fator de correção associado à resistividade térmica do solo

ρ_s	$\mathrm{f}_{\rho s}$	**Interpretação prática**
1,0	1,18	Solo com boa dissipação térmica, geralmente mais úmido ou com características favoráveis à transferência de calor.
1,5	1,10	Condição favorável em relação ao valor de referência usual.
2,0	1,05	Solo com dissipação térmica ligeiramente melhor que a condição de referência.
2,5	1,00	Valor de referência usual para linhas subterrâneas quando não há informação mais precisa sobre o solo.
3,0	0,96	Solo mais desfavorável, com menor capacidade de dissipação térmica; pode exigir aumento de seção.

Nota: ρ_s representa a resistividade térmica do solo, expressa em $[\mathrm{K} \cdot \mathrm{m/W}]$. Este fator é aplicável principalmente a linhas subterrâneas. Quando a resistividade térmica real do solo for conhecida, ela deve ser usada no dimensionamento. Em instalações enterradas extensas ou críticas, pode ser necessária análise térmica mais detalhada.

O fator de correção associado à resistividade térmica do solo não é necessário quando os condutores não são instalados em linhas subterrâneas, isto é, quando o circuito percorre eletrodutos aparentes, eletrodutos embutidos em paredes ou lajes, eletrocalhas, bandejas, leitos ou outros métodos de instalação não enterrados. Também pode ser dispensado quando a tabela de capacidade de condução de corrente utilizada já corresponde à condição real ou assumida de resistividade térmica do solo, ou quando a instalação subterrânea é muito curta e não representa a condição térmica determinante do circuito. Entretanto, em linhas enterradas relevantes, especialmente alimentadores longos, circuitos de maior corrente, instalações industriais, redes externas ou locais com solo seco, compactado, arenoso ou de baixa capacidade de dissipação térmica, a resistividade térmica do solo deve ser avaliada, pois ela pode reduzir a dissipação de calor dos cabos e exigir aumento da seção nominal dos condutores.

A Tabela 11.4 apresenta fatores relacionados à presença de correntes harmônicas em circuitos com cargas não lineares. Essa verificação é especialmente relevante em instalações com grande quantidade de fontes chaveadas, computadores, inversores, iluminação eletrônica, equipamentos de automação e cargas eletrônicas em geral.

Tabela 11.4: Fator de correção associado a correntes harmônicas no condutor neutro

I_3/I_{fase} [%]	**Base**	f_h	**Interpretação prática**
0–15	Fase	1,00	A presença de terceira harmônica é pequena; em geral, não se exige correção adicional específica pelo neutro.
15–33	Fase	0,86	A terceira harmônica já é significativa; a seção deve ser verificada com fator de correção aplicado à capacidade de condução.
33–45	Neutro	0,86	A corrente no neutro torna-se critério relevante, pois harmônicas de terceira ordem e seus múltiplos somam-se no condutor neutro.
> 45	Neutro	1,00	A escolha passa a ser governada pela corrente do neutro; pode ser necessário adotar neutro com seção igual ou superior à das fases.

Nota: I_3/I_{fase} representa a razão percentual entre a componente de terceira harmônica da corrente e a corrente de fase considerada. A coluna "Base" indica qual corrente deve ser usada como referência para a escolha da seção do condutor: corrente de fase ou corrente de neutro. Esta tabela é aplicável a circuitos trifásicos com neutro, especialmente quando alimentam cargas não lineares. Em instalações com grande presença de equipamentos eletrônicos, fontes chaveadas, variadores de frequência, iluminação eletrônica ou cargas de informática, recomenda-se avaliar a corrente no neutro e o conteúdo harmônico por medição ou por dados de projeto.

Saiba Mais

Origem da terceira harmônica e sua mitigação: A terceira harmônica surge quando a corrente de uma carga não é perfeitamente senoidal. Isso ocorre, por exemplo, em cargas não lineares, como fontes chaveadas, computadores, equipamentos eletrônicos, iluminação com reatores eletrônicos, inversores e retificadores. Nesses casos, a corrente pode ser decomposta em uma componente fundamental e em componentes harmônicas:

$$i(t) = I_1 \cdot \sin(\omega t) + I_3 \cdot \sin(3\omega t + \phi_3) + I_5 \cdot \sin(5\omega t + \phi_5) + \cdots \tag{11.15}$$

Em sistemas trifásicos equilibrados, a terceira harmônica tem uma característica especial. Como as fases fundamentais estão defasadas de $120°$, a harmônica de ordem h apresenta defasagem angular igual a:

$$h \cdot 120°. \tag{11.16}$$

Para $h = 3$, tem-se:

$$3 \cdot 120° = 360°. \tag{11.17}$$

Portanto, as componentes de terceira harmônica das três fases ficam em fase entre si. Por isso, em vez de se cancelarem no neutro, elas se somam:

$$I_{N,3} \approx I_{3,R} + I_{3,S} + I_{3,T}. \tag{11.18}$$

Essa é a principal razão pela qual a terceira harmônica recebe atenção especial em circuitos trifásicos com neutro. O mesmo comportamento ocorre com as harmônicas múltiplas de três, chamadas de harmônicas triplas:

$$h = 3,\ 9,\ 15,\ 21, \ldots \tag{11.19}$$

pois todas elas possuem comportamento de sequência zero e tendem a se somar no condutor neutro.
As harmônicas pares, como a segunda e a quarta, em geral são menos relevantes em cargas cuja forma de onda possui simetria de meia onda. Nessa condição:

$$i\left(t + \frac{T}{2}\right) = -i(t), \tag{11.20}$$

o que tende a eliminar as harmônicas pares. Quando harmônicas pares aparecem de forma significativa, elas geralmente indicam assimetria, saturação, defeito, componente contínua ou funcionamento anormal do equipamento.

As harmônicas ímpares não múltiplas de três, como a quinta e a sétima, também podem ser importantes, principalmente em motores, transformadores e sistemas industriais. Entretanto, elas não se somam no neutro da mesma forma que a terceira harmônica. A quinta harmônica está associada à sequência negativa e a sétima à sequência positiva, podendo causar aquecimento, perdas adicionais, vibrações e torques pulsantes, mas sua influência no neutro é diferente da terceira harmônica.

A mitigação da terceira harmônica pode ser feita por meio de várias medidas de projeto, como:

- Dimensionamento adequado do condutor neutro;
- Redução do agrupamento de circuitos com cargas não lineares;
- Uso de transformadores e painéis adequados para cargas com conteúdo harmônico;
- Instalação de filtros passivos sintonizados para harmônicas específicas;
- Uso de filtros ativos de harmônicas;
- Separação de circuitos com forte presença de cargas eletrônicas;
- Análise do conteúdo harmônico por medição ou por dados fornecidos pelo fabricante.

Capacitores comuns de correção de fator de potência não devem ser usados como solução automática para harmônicas, pois podem entrar em ressonância com a instalação e amplificar determinadas frequências harmônicas. Por isso, quando houver presença significativa de terceira harmônica ou de outras componentes harmônicas, a compensação deve ser estudada de forma específica.

Aviso

Uso de fatores tabelados: Os fatores de correção não devem ser adotados de forma arbitrária. Em projeto profissional, devem ser consultadas as tabelas normativas correspondentes ao método de instalação, ao tipo de cabo, ao material condutor, ao isolamento, à temperatura ambiente, ao agrupamento real dos circuitos e às condições especiais da instalação. Quando mais de um fator for aplicável, deve-se verificar se os fatores podem ser combinados diretamente ou se a própria tabela normativa já incorpora parte desses efeitos.

11.2.4 Coordenação com dispositivos de proteção

Além de atender à capacidade de condução de corrente, o condutor deve estar corretamente coordenado com o dispositivo de proteção do circuito (os fundamentos podem ser encontrados no Capítulo 6). Essa coordenação é necessária para que o circuito opere normalmente sem desligamentos indevidos, mas também para que o dispositivo de proteção atue antes que o condutor seja submetido a uma condição térmica perigosa.

No dimensionamento contra sobrecargas, a relação básica entre a corrente de projeto I_B, a corrente nominal do dispositivo de proteção I_n e a capacidade de condução de corrente do condutor I_Z é:

$$I_B \leq I_n \leq I_Z. \tag{11.21}$$

Essa condição indica que o dispositivo de proteção deve suportar a corrente normal de operação do circuito, mas não deve possuir corrente nominal superior à capacidade admissível do condutor. Assim, evita-se tanto o desligamento indevido em operação normal quanto a ausência de proteção térmica adequada.

A verificação completa contra sobrecargas também deve considerar a corrente convencional de atuação do dispositivo de proteção, indicada por I_2 (nomenclatura adotada pela **ABNT**). De forma geral, deve-se verificar:

$$I_2 \leq 1{,}45 \cdot I_Z. \tag{11.22}$$

Nota

Corrente convencional de atuação: A grandeza I_2 não representa uma segunda fase nem uma segunda corrente de projeto do circuito. Ela indica a corrente convencional de atuação do dispositivo de proteção contra sobrecarga. Para disjuntores, está associada à corrente que provoca a atuação do dispositivo em uma condição convencional de ensaio; para fusíveis, corresponde à corrente convencional de fusão.
Enquanto I_B está associada à carga prevista no circuito, I_n caracteriza o dispositivo de proteção e I_Z representa a capacidade de condução de corrente do condutor, I_2 descreve o comportamento do dispositivo em situação de sobrecarga. Seu valor não é escolhido livremente pelo projetista: ele depende do tipo de dispositivo, da norma de fabricação aplicável e dos dados fornecidos pelo fabricante.
De forma prática, pode-se escrever:

$$I_2 = \alpha_2 \cdot I_n, \tag{11.23}$$

em que α_2 é o coeficiente convencional de atuação ou de fusão do dispositivo de proteção. Em alguns disjuntores, por exemplo, podem aparecer valores como $\alpha_2 = 1{,}45$ ou $\alpha_2 = 1{,}30$, conforme o tipo de dispositivo e a norma aplicável. Em fusíveis, esse coeficiente pode assumir outros valores, como $\alpha_2 = 1{,}60$ ou $\alpha_2 = 1{,}75$, dependendo da categoria do fusível e dos dados normativos ou do fabricante.

A grandeza I_2 depende do tipo de dispositivo de proteção adotado, como disjuntor termomagnético, fusível ou outro dispositivo equivalente. Em estudos preliminares, é comum enfatizar a condição da Equação 11.21; em projeto executivo, entretanto, a verificação da Equação 11.22 também deve ser realizada.

Exemplo

Proteção-condutor: Retomando o exemplo anterior (Seção 11.2.2), considere a corrente de projeto $I_B = 4{,}9\,[\text{A}]$.

Usa-se um disjuntor termomagnético com corrente nominal $I_n = 10\,[\text{A}]$. Essa escolha é compatível com a corrente de projeto, pois $I_B \leq I_n$, ou seja, $4{,}9 \leq 10$. Portanto, o disjuntor não deve atuar indevidamente durante a operação normal prevista do circuito, salvo em situação de sobrecarga, curto-circuito, defeito ou outra condição anormal.

1. Coordenação com o condutor. A capacidade de condução de corrente corrigida do condutor, representada por I_Z, deve ser, no mínimo, igual à corrente nominal do dispositivo de proteção. Assim, deve-se atender a $I_n \leq I_Z$. Para o disjuntor adotado, isso implica $I_Z \geq 10\,[\text{A}]$. Essa é a *primeira exigência* imposta pela coordenação entre o condutor e o disjuntor, conforme a Equação 11.21.

2. Corrente convencional de atuação. Agora considere que, para o dispositivo adotado, o fabricante informa um coeficiente convencional de atuação $\alpha_2 = 1{,}60$. Nesse caso, tem-se $I_2 = \alpha_2 \cdot I_n = 1{,}60 \cdot 10 = 16\,[\text{A}]$, conforme a Equação 11.23. É importante ressaltar que α_2 é um definido pelas normativas dos fabricantes, não é arbitrário.

Substituindo I_2 na verificação contra sobrecarga, dada pela Equação 11.22, obtém-se $16 \leq 1{,}45 \cdot I_Z$, isto é, $I_Z \geq 16/1{,}45 \approx 11{,}0\,[\text{A}]$. Esta é a *segunda exigência* e, neste caso, ela é mais restritiva que a primeira, pois $11{,}0\,[\text{A}] > 10\,[\text{A}]$.

Assim, a capacidade corrigida mínima do condutor não deve ser tomada como $10\,[\text{A}]$, mas como $I_Z \geq 11{,}0\,[\text{A}]$. Em outras palavras, não basta verificar apenas $I_n \leq I_Z$, pois a condição $I_2 \leq 1{,}45 \cdot I_Z$ impõe uma exigência diferente.

Nota

Papel da corrente corrigida de seleção: Neste ponto, é didaticamente importante distinguir I_B de I'_B. A corrente I_B é a corrente real prevista para o circuito em condição normal de operação e, por isso, é usada para selecionar a corrente nominal do dispositivo de proteção, verificando-se $I_B \leq I_n$. Já I'_B não representa uma nova corrente física da carga; ela é a forma equivalente, do lado da tabela, do critério térmico $I_Z \geq I_B$. Portanto, I'_B indica a capacidade tabelada mínima que o condutor deveria ter apenas para atender à corrente de projeto, após considerados os fatores de correção. Quando a coordenação com o dispositivo de proteção impõe valores maiores, como ocorre neste exemplo, I'_B deixa de ser o critério determinante.

Exemplo

Capacidade mínima tabelada: Para evitar ambiguidade, nesta continuação do exemplo anterior, I_Z representa a capacidade de condução de corrente já corrigida para as condições reais de instalação, enquanto $I_{Z,\text{tab}}$ representa a capacidade de condução de corrente obtida diretamente na tabela normativa, antes da aplicação dos fatores de correção.

Como as tabelas normativas fornecem valores para condições de referência, é necessário converter as exigências corrigidas para exigências equivalentes de tabela. O critério associado à corrente de projeto é $I_{Z,\text{tab}} \geq I'_B$. Como no exemplo anterior $I'_B = 7{,}4\,[\text{A}]$, esse seria o requisito mínimo se apenas a corrente da carga fosse considerada.

Entretanto, a coordenação com o disjuntor impôs uma condição mais restritiva: $I_Z \geq 11{,}0\,[\text{A}]$. Como $I_Z = I_{Z,\text{tab}} \cdot \text{f}_t \cdot \text{f}_g$ e, neste exemplo, $\text{f}_t \cdot \text{f}_g \approx 0{,}66$, a capacidade tabelada mínima deve satisfazer $I_{Z,\text{tab}} \geq 11{,}0/0{,}66 \approx 16{,}7\,[\text{A}]$.

Portanto, embora $I'_B = 7{,}4\,[\text{A}]$ represente a exigência mínima associada à corrente de projeto, ela não governa a escolha final neste caso. A exigência determinante vem da verificação com I_2, que conduz a $I_{Z,\text{tab}} \geq 16{,}7\,[\text{A}]$. Esse resultado mostra que a seleção da seção do condutor deve atender simultaneamente à corrente da carga, à corrente nominal do dispositivo de proteção e à corrente convencional de atuação.

Caso uma seção preliminar atenda à corrente corrigida, mas não atenda à coordenação com o dispositivo de proteção, devem ser revistas a seção do condutor, a corrente nominal do dispositivo ou ambos. O objetivo é garantir que o dispositivo proteja efetivamente o condutor, sem impedir a operação normal do circuito.

Nota

Verificação conjunta: A coordenação com a proteção não deve ser analisada de forma isolada. A seção do condutor deve atender à capacidade de condução de corrente corrigida, à queda de potencial elétrico admissível, às seções mínimas normativas e à coordenação com o dispositivo de proteção. A seção final será aquela que satisfizer simultaneamente todos os requisitos aplicáveis.

11.2.5 Critério da queda de potencial elétrico

Além dos critérios térmicos e de proteção, o condutor deve permitir que a diferença de potencial elétrico disponível nos bornes da carga permaneça dentro de limites aceitáveis. Essa diferença é medida diretamente nos terminais da carga e expressa como fração da tensão nominal da fonte, de modo que a queda ao longo da linha reduz a tensão efetivamente entregue à carga. Um desvio excessivo pode comprometer o funcionamento de motores, reduzir o fluxo luminoso de luminárias, afetar equipamentos eletrônicos e produzir perdas adicionais na instalação.

A queda de potencial elétrico nos bornes da carga depende do comprimento do percurso, da seção transversal e do material do condutor, do tipo de fonte e, em análises mais completas, da reatância dos condutores e do fator de potência da carga. Em circuitos de sinal alternada, as magnitudes de tensão e corrente são medidas em regime permanente e expressos em valor eficaz (RMS, Seção 4.2.1). Em estudos em contexto de baixa tensão, pode-se adotar uma expressão simplificada baseada exclusivamente na resistência ôhmica do condutor.

Para justificar essa aproximação, parte-se da relação entre variação de diferença de potencial em um condutor ΔV_{cond}, resistência $R_{\Delta l}$ e corrente I. Para um trecho do condutor, de comprimento Δl, pode-se escrever:

$$\Delta V_{\text{cond}} \approx R_{\Delta l} \cdot I, \tag{11.24}$$

onde a resistência elétrica é proporcional à resistividade do material ρ e ao comprimento do trecho, e inversamente proporcional à área da seção transversal do condutor, aqui denotada por A. Adota-se A em vez de s ou S, notações encontradas em outros autores, para evitar confusão com a potência aparente S introduzida no Capítulo 2. Assim, para um material homogêneo e isotrópico:

$$R_{\Delta l} \approx \rho \cdot \frac{\Delta l}{A}. \tag{11.25}$$

Substituindo a Equação 11.25 na Equação 11.24, obtém-se a queda de potencial elétrico em um único condutor (trecho de ida ou trecho de retorno, comprendido entre um borne da fonte e um borne da carga):

$$\Delta V_{\text{cond}} \approx \rho \cdot \frac{\Delta l}{A} \cdot I. \tag{11.26}$$

Em **circuitos bi e monofásicos** (**F**-**F** e **F**-**N**), a corrente percorre o condutor de ida e o condutor de retorno. Por isso, considerando a mesma variação de comprimento Δl em cada condutor, a queda total aproximada é:

$$\Delta V \approx 2 \cdot \Delta V_{\text{cond}} \approx 2 \cdot \rho \cdot \frac{\Delta l}{A} \cdot I. \tag{11.27}$$

Para **circuitos trifásicos** equilibrados (ou, assumindo uma condição semelhante ao equilibrio), a composição vetorial das quedas de potencial elétrico nos condutores introduz o fator $\sqrt{3}$, associado à geometria do sistema trifásico equilibrado discutida no Capítulo 3. Assim, em uma aproximação resistiva, pode-se escrever:

$$\Delta V \approx \sqrt{3} \cdot \Delta V_{\text{cond}} \approx \sqrt{3} \cdot \rho \cdot \frac{\Delta l}{A} \cdot I. \tag{11.28}$$

onde:

- ΔV é a queda de potencial elétrico no circuito [V] (RMS), medida nos bornes da carga. O símbolo "Δ" representa a variação desta grandeza em relação ao valor nominal da tensão da fonte (V_L ou V_F);
- ρ é a resistividade elétrica do material condutor [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]. Neste caso trata-se de uma propriedade unidimensional porque a unidade de medida, sem fatores de conversão entre unidades, é reduzida para [$\Omega \cdot \text{m}$];
- Δl é o comprimento do trecho sob análise, medido entre a origem do circuito (alimentador) e a carga [m];
- I é a corrente do circuito [A] (RMS), que depende da carga conectada e não do comprimento do trecho;
- A é a área da seção transversal do condutor [mm^2].

Aviso

Limite de validade da expressão simplificada: As Equações 11.27 e 11.28 são aproximações didáticas, adequadas para introduzir o efeito do comprimento, da corrente e da seção do condutor. Em projetos executivos, especialmente em circuitos longos, alimentadores industriais, grandes seções ou cargas com baixo fator de potência, deve-se considerar o método normativo aplicável, incluindo resistência, reatância, fator de potência e temperatura de operação do condutor.

Saiba Mais

Queda de potencial elétrico com reatância dos condutores: As expressões simplificadas de queda de potencial elétrico consideram apenas a resistência elétrica dos condutores. Essa aproximação é adequada em muitos circuitos curtos de baixa tensão, especialmente quando as seções são pequenas e o fator de potência da carga é próximo da unidade. Em alimentadores longos, circuitos industriais, grandes seções de condutores ou cargas com baixo fator de potência, entretanto, a reatância da linha também pode influenciar o resultado.
De forma mais completa, a impedância do trecho pode ser representada por:

$$Z_{\Delta l} = R_{\Delta l} + jX_{\Delta l}, \tag{11.29}$$

em que $R_{\Delta l}$ é a resistência do trecho [Ω] e $X_{\Delta l}$ é a reatância do trecho [Ω] (associado, por exemplo, à presença de arranjos de componentes passivos como indutores e capacitores). A resistência está associada às perdas por efeito Joule, enquanto a reatância está associada aos campos magnéticos produzidos pela corrente alternada nos condutores.
Para um **circuito bi ou monofásico**, **F-F**ou **F-N**, a queda de potencial elétrico aproximada pode ser escrita como:

$$\Delta V \approx 2 \cdot I \cdot (R_{\Delta l} \cdot \cos\phi + X_{\Delta l} \cdot \sin\phi)\,. \tag{11.30}$$

Para um **circuito trifásico** equilibrado, a forma usual é:

$$\Delta V \approx \sqrt{3} \cdot I \cdot (R_{\Delta l} \cdot \cos\phi + X_{\Delta l} \cdot \sin\phi)\,. \tag{11.31}$$

Nessas expressões, ϕ é o ângulo associado ao fator de potência da carga. O termo $R_{\Delta l} \cdot \cos\phi$ representa a contribuição resistiva da linha, enquanto $X_{\Delta l} \cdot \sin\phi$ representa a contribuição reativa. Em cargas indutivas, comuns em motores e transformadores, a parcela reativa tende a aumentar a queda de potencial elétrico. Em situações com comportamento capacitivo, o sinal da parcela reativa deve ser analisado conforme a convenção adotada.
Em primeira aproximação, a resistência pode-se estimar pela Equação11.25. Já a reatância depende da geometria da instalação, do espaçamento entre condutores, do tipo de cabo, da frequência e do método de instalação. Por isso, em projetos executivos, $X_{\Delta l}$ deve ser obtida em tabelas técnicas, catálogos de fabricantes ou métodos normativos.

A queda de potencial elétrico também pode ser expressa em forma relativa. Define-se:

$$\delta_V = \frac{\Delta V}{V}, \qquad \delta_V[\%] = 100 \cdot \frac{\Delta V}{V}. \tag{11.32}$$

Nessa forma, δ_V é a queda de potencial elétrico relativa, em valor adimensional, e $\delta_V[\%]$ é a mesma grandeza expressa em porcentagem. Por exemplo, uma queda de $4\,\%$ corresponde a $\delta_V = 0{,}04$.

Em um **circuito monofásico**, alimentado por uma rede em estrela (⅄), tem-se $P \approx V_F \cdot I \cdot \cos\phi$. Em um **circuito bifásico**, tem-se $P \approx V_L \cdot I \cdot \cos\phi$. Assim, em ambos os casos, pode-se escrever $I \approx P/(V\cos\phi)$, com $V := V_F$ para o caso monofásico e $V := V_L$ para o caso bifásico. Portanto, a Equação 11.27 pode ser escrita em função da potência ativa e do fator de potência:

$$\delta_V = \frac{\Delta V}{V} \approx 2 \cdot \rho \cdot \frac{\Delta l}{A} \cdot \frac{P}{V^2 \cdot \cos\phi}. \tag{11.33}$$

Em um **circuito trifásico**, considerando $P \approx \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I \cdot \cos\phi$, tem-se $I \approx P/(\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos\phi)$ equilibrada (ou, correntes trifásicas suficientemente perto do equilíbrio). Logo, a Equação 11.28 pode ser escrita como:

$$\delta_V = \frac{\Delta V}{V_L} \approx \rho \cdot \frac{\Delta l}{A} \cdot \frac{P}{V_L^2 \cdot \cos\phi}. \tag{11.34}$$

Nota

Comparação: As Equações 11.33 e 11.34 mostram que, para uma mesma potência ativa, um mesmo fator de potência, uma mesma liga metálica, uma mesma seção transversal do condutor e um mesmo comprimento de percurso, a queda relativa de potencial elétrico depende principalmente do tipo de alimentação e da diferença de potencial elétrico nominal do circuito. Ou seja:

- Em circuitos monofásicos ou bifásicos, a corrente percorre um condutor de ida e um condutor de retorno, o que introduz o fator 2 no modelo simplificado. Em circuitos trifásicos equilibrados, a queda entre linhas resulta da composição vetorial das grandezas de fase, conduzindo a uma expressão própria para esse tipo de alimentação.
- A queda relativa diminui de forma inversamente proporcional ao quadrado da diferença de potencial elétrico nominal. Portanto, quanto maior for a diferença de potencial elétrico de alimentação, menor tende a ser a queda percentual, mantidas as demais condições.

A Figura 11.2 ilustra essa relação: para uma mesma potência ativa, fator de potência e seção do condutor, elevar V reduz δ_V de forma inversamente proporcional ao quadrado da tensão.

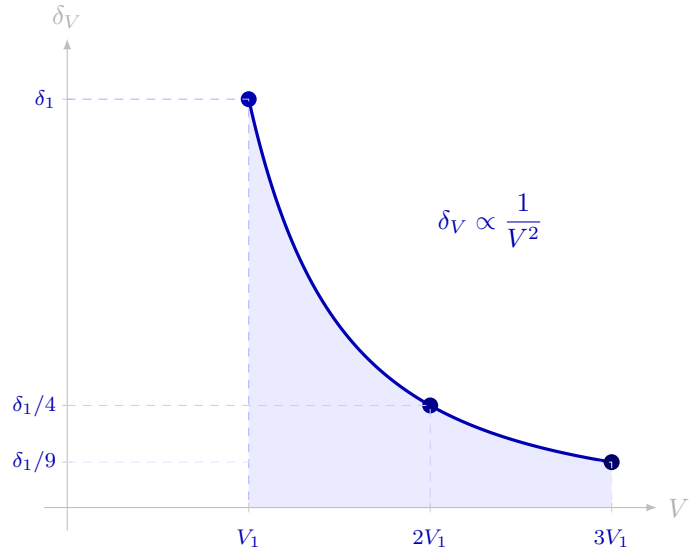

Figura 11.2: Queda percentual de tensão δ_V em função da tensão V, para potência ativa, comprimento e seção do condutor fixos. Por exemplo, aumentos de duas e três vezes na diferença de potencial elétrico nominal reduzem a queda percentual para um quarto e para um nono do valor inicial, respectivamente.

Importante

Uso da queda percentual: A forma percentual é útil porque permite comparar circuitos de diferentes níveis de diferença de potencial elétrico. Uma queda de $4\,[\mathrm{V}]$ possui efeitos diferentes em um circuito de $127\,[\mathrm{V}]$ e em um circuito de $380\,[\mathrm{V}]$. Por isso, em projeto, costuma-se verificar a razão $\Delta V/V$ ou o valor equivalente em porcentagem.

Exemplo

Percurso máximo e bitola mínima: As Equações 11.33 e 11.34 podem ser reunidas em uma forma compacta, útil para responder a duas perguntas frequentes de projeto. Para isso, predefine-se a grandeza auxiliar W, dada por:

$$W = \begin{cases} {V_F}^2/2, & \text{circuito monofásico fase-neutro,} \\ {V_L}^2/2, & \text{circuito bifásico ou fase-fase,} \\ {V_L}^2, & \text{circuito trifásico equilibrado.} \end{cases} \tag{11.35}$$

Com essa definição, a queda relativa de potencial elétrico pode ser escrita, de forma aproximada, como:

$$\delta_V \approx \underbrace{\frac{\rho \cdot \Delta l}{A}}_{\text{condutor}} \cdot \underbrace{\frac{1}{W}}_{\text{fonte}} \cdot \underbrace{\frac{P}{\cos\phi}}_{\text{carga}}. \tag{11.36}$$

Nessa expressão, P é a potência ativa $[\mathrm{W}]$, $\cos\phi$ é o fator de potência, Δl é o comprimento do percurso $[\mathrm{m}]$, ρ é a resistividade elétrica da liga metálica $[\Omega \cdot \mathrm{mm}^2/\mathrm{m}]$ e A é a área ou seção transversal do condutor $[\mathrm{mm}^2]$.

1. Qual é o percurso máximo admissível? Isola-se Δl:

$$\Delta l_{\max} \approx \frac{\delta_{V,\mathrm{adm}} \cdot A}{\rho} \cdot W \cdot \frac{\cos\phi}{P}. \tag{11.37}$$

Essa forma responde à pergunta: "Para uma carga, fonte e condutor elétrico (bitola e liga metálica) conhecidos, qual é a maior distância que o circuito pode ter sem ultrapassar a queda de potencial elétrico admissível?"

2. Qual é a seção transversal mínima do condutor? Isola-se a seção transversal do condutor:

$$A_{\min} \approx \frac{\rho \cdot \Delta l}{\delta_{V,\mathrm{adm}}} \cdot \frac{1}{W} \cdot \frac{P}{\cos\phi}. \tag{11.38}$$

Essa forma responde à pergunta: "Para uma carga, fonte e condutor elétrico (percurso e liga metálica) conhecidos, qual é a bitola mínima para não ultrapassar a queda de potencial elétrico admissível?"

Aviso

Fonte real: A queda de potencial elétrico não depende apenas da relação carga-condutor, comprimento do percurso e seção transversal. Em uma instalação real, a fonte de alimentação também possui limitações, como impedância interna e capacidade de fornecimento de corrente, especialmente durante partidas ou transitórios.
Assim, mesmo que os condutores sejam dimensionados corretamente, uma fonte fraca, distante ou inadequada pode não conseguir fornecer a corrente necessária para a partida de uma carga, especialmente no caso de motores, compressores, bombas e equipamentos com elevada corrente inicial. Nessa situação, a queda de potencial elétrico pode ocorrer tanto ao longo dos condutores quanto na própria fonte ou no sistema de alimentação a montante.
Nas análises simplificadas deste capítulo, assume-se que a fonte é suficientemente rígida, isto é, capaz de manter sua diferença de potencial elétrico nominal e fornecer a potência demandada pelo conjunto carga-condutor. Essa hipótese permite concentrar o estudo na influência do comprimento, da corrente, da seção transversal e do material do condutor.

A **ABNT NBR 5410** estabelece limites para a queda de potencial elétrico admissível em instalações de baixa tensão. Esses limites dependem do tipo de instalação, da origem considerada e da finalidade do circuito. Em estudos preliminares, é comum adotar o valor de $4\,\%$ como referência para circuitos terminais em instalações alimentadas diretamente em baixa tensão, mas o projetista deve verificar o limite aplicável ao caso real.

Assim, para uma instalação em $220\,[\mathrm{V}]$, uma queda admissível de $4\,\%$ corresponde a:

$$\Delta V_{\text{adm}} = 0{,}04 \cdot 220 = 8{,}8\,[\mathrm{V}]. \tag{11.39}$$

Exemplo

Queda de potencial elétrico admissível: Retomando o contexto do exemplo da Seção 11.2.2, no caso do motor da bomba de piscina, é possível ter:

- Comprimento do circuito: $\Delta l = 30\,[\mathrm{m}]$;
- Corrente de projeto: $I = 4{,}9\,[\mathrm{A}]$;
- Resistividade da liga de cobre: $\rho = 0{,}0175\,[\Omega \cdot \mathrm{mm}^2/\mathrm{m}]$;
- Queda de potencial elétrico admissível para o exemplo: $\Delta V_{\text{adm}} = 4\,[\mathrm{V}]$.

Aplicando a Equação 11.28 e isolando a seção transversal do condutor, obtém-se:

$$A_{\text{min}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 0{,}0175 \cdot 30 \cdot 4{,}9}{4} \approx 1{,}1\,[\mathrm{mm}^2]. \tag{11.40}$$

Como as seções comerciais normalizadas não são contínuas, deve-se escolher a seção imediatamente superior ao valor calculado e verificar os demais critérios. Neste caso, pelo critério de queda de potencial elétrico, a seção comercial imediatamente superior seria $1{,}5\,[\mathrm{mm}^2]$.

Nota

Influência do comprimento do circuito: A queda de potencial elétrico aumenta com o comprimento do circuito e com a corrente. Por isso, em circuitos longos, o critério da queda de potencial elétrico pode exigir uma seção transversal maior que aquela obtida apenas pela capacidade de condução de corrente. Nesses casos, diz-se que o condutor foi dimensionado pela queda de potencial elétrico.

Para uma liga de cobre eletrolítico, de aplicações elétricas, admitindo $\rho = 0{,}0175\,[\Omega \cdot \mathrm{mm}^2/\mathrm{m}]$, $\delta_{V,\text{adm}} = 0{,}04$, $\cos\phi \approx 1$ e $A_{\text{ref}} = 1{,}5\,[\mathrm{mm}^2]$, uma carga de $100\,[\mathrm{VA}]$ teria comprimento crítico da ordem de centenas de metros. Já uma carga de $1000\,[\mathrm{VA}]$ teria valores aproximadamente da ordem de $28\,[\mathrm{m}]$ em $127\,[\mathrm{V}]$ fase-neutro e $83\,[\mathrm{m}]$ em $220\,[\mathrm{V}]$ fase-fase. Assim, em circuitos residenciais curtos, a queda de potencial elétrico pode não ser determinante; porém, em cargas maiores ou percursos longos, ela pode passar a definir a seção final do condutor.

11.2.6 Seções mínimas dos condutores

Mesmo quando os critérios de capacidade de condução de corrente, proteção e queda de potencial elétrico indicam uma seção transversal pequena, a seção final do condutor não pode ser inferior aos valores mínimos admitidos pela norma. Em instalações elétricas de baixa tensão, esses limites são estabelecidos pela **ABNT NBR 5410**, em especial no item referente à seção dos condutores de fase e na tabela de seções mínimas dos condutores.

Em conformidade com as prescrições normativas para instalações fixas, destacam-se os seguintes valores mínimos de seção transversal para condutores e cabos de cobre isolados:

- $1{,}5\,[\mathrm{mm}^2]$ para circuitos de iluminação;
- $2{,}5\,[\mathrm{mm}^2]$ para circuitos de força, categoria que inclui os circuitos de tomadas de corrente.

Esses valores devem ser entendidos como mínimos normativos, não como resultado final automático do dimensionamento. A seção adotada deve ser a maior entre aquela exigida pela capacidade de condução de corrente, pela coordenação com os dispositivos de proteção, pela queda de potencial elétrico, pela suportabilidade a curto-circuito e pela seção mínima normativa aplicável.

Em circuitos específicos, alimentadores, motores, equipamentos de maior potência, condutores de alumínio ou instalações sujeitas a esforços mecânicos, podem ser exigidas seções maiores.

Importante

Seção mínima: A seção calculada por corrente ou por queda de potencial elétrico não deve ser adotada automaticamente se for menor que a seção mínima normativa. A seção final deve respeitar simultaneamente a capacidade de condução, a queda de potencial elétrico, a coordenação com a proteção e a seção mínima aplicável ao tipo de circuito.

Exemplo

Ajuste para seção mínima: No exemplo do motor da bomba da piscina, o critério de queda de potencial elétrico resultou em aproximadamente $1{,}1\,[\text{mm}^2]$ segundo a Equação 11.40, e o critério térmico também indicou que uma seção pequena poderia ser suficiente. Entretanto, por se tratar de circuito para motor, adota-se seção mínima compatível com circuito de força. Assim, para condutor de liga de cobre, a seção de fase deve ser: $A_{\text{fase}} \geq 2{,}5\,[\text{mm}^2]$.
Esse ajuste é importante: embora o cálculo simplificado pudesse conduzir a $1{,}5\,[\text{mm}^2]$, a prática normativa para circuitos de força conduz à adoção de $2{,}5\,[\text{mm}^2]$ como seção mínima no exemplo.

11.2.7 Condutor de proteção PE

O condutor de proteção **PE**, introduzido na Seção 6.7, conecta as massas dos equipamentos ao sistema de aterramento da instalação. Sua função é oferecer um caminho de baixa impedância para correntes de falta, permitindo a atuação dos dispositivos de proteção e reduzindo o risco de choque elétrico por contato indireto.

O condutor **PE** não deve ser dimensionado apenas como um condutor auxiliar. Ele faz parte do sistema de proteção contra choques elétricos e deve possuir seção compatível com a seção dos condutores de fase, com as condições de falta e com o esquema de aterramento adotado.

Quando o condutor de proteção é do mesmo material que os condutores de fase, e está instalado no mesmo eletroduto ou no mesmo cabo, a seção pode ser definida, em muitos casos, por tabela normativa em função da seção do condutor de fase. De forma resumida, para condutores de cobre, adota-se:

- Para $A_{\text{fase}} \leq 16\,[\text{mm}^2]$: $A_{\mathbf{PE}} = A_{\text{fase}}$;
- Para $16\,[\text{mm}^2] < A_{\text{fase}} \leq 35\,[\text{mm}^2]$: $A_{\mathbf{PE}} = 16\,[\text{mm}^2]$;
- Para $A_{\text{fase}} > 35\,[\text{mm}^2]$: $A_{\mathbf{PE}} = A_{\text{fase}}/2$.

Nota

Seção do condutor de proteçãoE: A regra simplificada em função da seção do condutor de fase é adequada para muitos casos usuais, mas não substitui a verificação normativa completa. Em situações específicas, como condutores de materiais diferentes, instalação separada, correntes de falta elevadas ou esquemas de aterramento particulares, pode ser necessário verificar a seção do **PE** pelo critério adiabático ou por requisitos adicionais.

11.2.8 Procedimento de dimensionamento

O dimensionamento de condutores deve ser realizado de forma sistemática. O procedimento começa pela determinação da corrente de projeto e avança pela aplicação dos critérios térmico, normativo, de queda de potencial elétrico e de coordenação com a proteção. Sempre que algum critério não for atendido, a seção deve ser ajustada e as verificações devem ser repetidas. A Figura 11.3 apresenta um fluxograma deste processo.

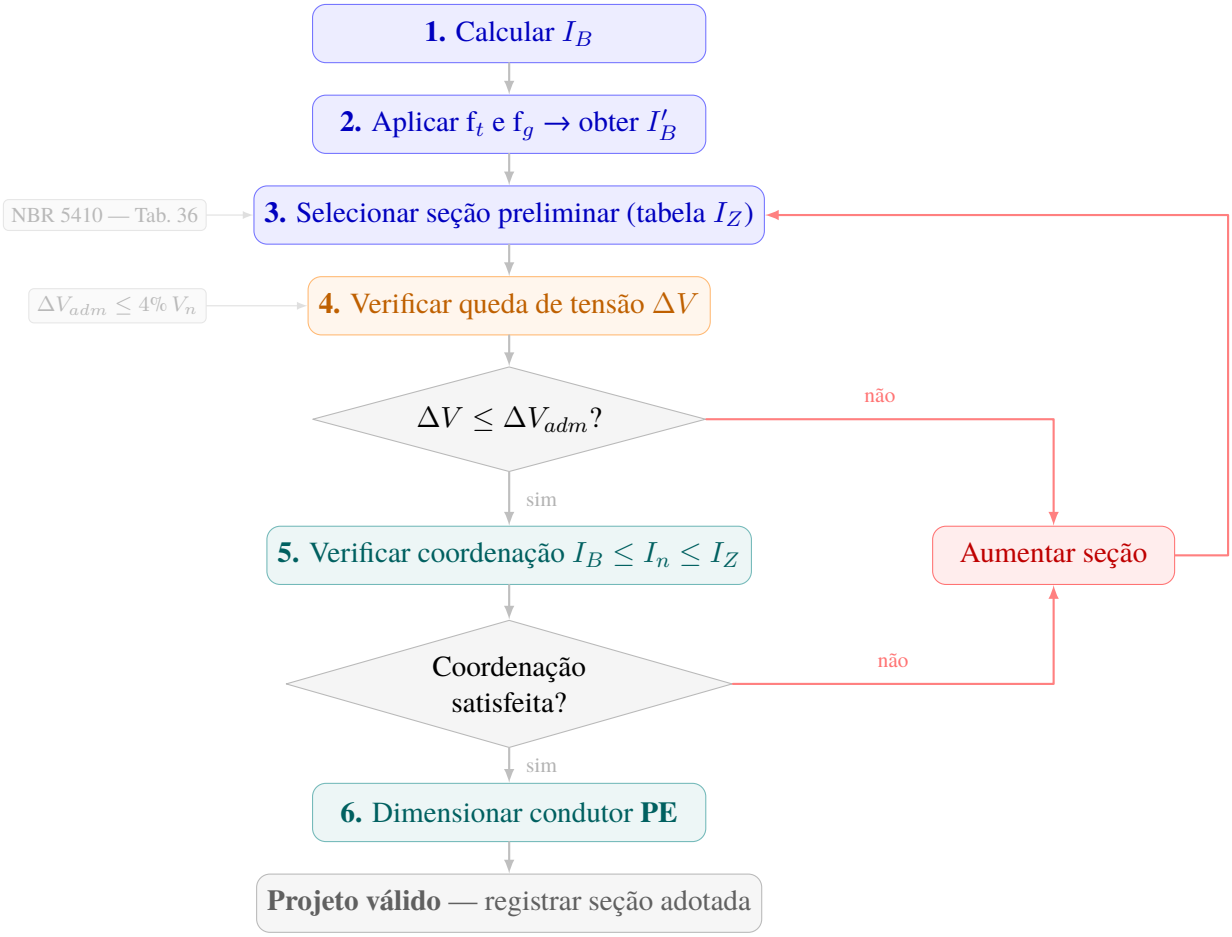

Figura 11.3: Fluxograma do procedimento padrão para dimensionamento de condutores e dispositivos de proteção com base em um quadro de cargas elétrico, predominantemente residencial. Trata-se de uma alternativa iterativa amplamente utilizada, embora não seja a única nem uma versão otimizada para processamento automático.

O procedimento resumido do fluxograma da Figura 11.3 pode ser organizado nas seguintes etapas:

1. Determinar a corrente de projeto I_B do circuito, isto é mostrado nos Capítulos 9 e 10;
2. Identificar o método de instalação e as condições reais. Obter a corrente corrigida I'_B.
3. Selecionar uma seção preliminar com capacidade de condução $I_Z \geq I'_B$;
4. Verificar a queda de potencial elétrico admissível e a seção mínima normativa aplicável;
5. Selecionar o dispositivo de proteção e verificar a coordenação proteção-condutor;
6. Dimensionar o condutor de proteção **PE**;
7. Adotar a maior seção que satisfaça simultaneamente todos os critérios.

! Importante

Visão de projeto: O dimensionamento de condutores é iterativo, e a seção final deve atender simultaneamente critérios normativos, térmicos, elétricos e de proteção.

A Tabela 11.5 amplia o estudo de caso, seguindo a sequência didática desde a Tabela 8.2 até a Tabela 10.11, para uma residência de três pavimentos com múltiplos ambientes e quadros secundários distribuídos. Além da potência instalada e da demanda estimada, incorpora fatores de correção por temperatura e agrupamento, a corrente corrigida de projeto, a capacidade de condução, a estimativa de queda de tensão e a indicação preliminar da corrente nominal e da curva de disparo dos disjuntores, aproximando o procedimento didático das condições reais de projetos residenciais mais complexos, sem perder o caráter preliminar dos cálculos.

Tabela 11.5: Quadro de cargas, demanda e dimensionamento preliminar de condutores e disjuntores

k	Carga	cos ϕ	Δl [m]	f_u	$f_{s\|c}$	P [W]	D_P [W]	Q [VAr]	D_Q [VAr]	S [VA]	D_S [VA]	$I_{B,\mathrm{R}}$ [A]	$I_{B,\mathrm{S}}$ [A]	$I_{B,\mathrm{T}}$ [A]	f_t	f_g	I'_B [A]	A_{pre} [mm^2]	I_Z [A]	δ_V [%]	CD	I_n [A]
000	**QGBT**	**0,96**	30 ± 5	—	—	**63700**	**33189**	**12361**	**6768**	**66344**	**34639**	**103,61**	**103,78**	**103,37**	**0,94**	—	**110,4**	**50**	**151**	**0,86**	**C**	**125**
100	**QS1 – Dormitórios**	**0,96**	5 ± 2	—	—	**18100**	**9576**	**2923**	**1722**	**18702**	**9942**	**27,68**	**22,57**	**38,25**	**0,94**	**0,70**	**58,1**	**16**	**76**	**0,16**	**C**	**40**
110	Chuveiro elétrico 1	1,00	5 ± 2	1,00	0,50	5400	2700	0	0	5400	2700	24,55	0	24,55	0,94	—	26,1	4	32	0,49	B	30
111	Chuveiro elétrico 2	1,00	6 ± 2	1,00	0,50	5400	2700	0	0	5400	2700	0	24,55	24,55	0,94	—	26,1	4	32	0,59	B	30
120	Ar-condicionado 1	0,90	7 ± 2	0,75	0,90	1000	675	484	327	1111	750	3,41	0	3,41	0,94	—	3,6	2,5*	24	0,15	C	4
121	Ar-condicionado 2	0,90	5 ± 2	0,75	0,90	1000	675	484	327	1111	750	0	3,41	3,41	0,94	—	3,6	2,5*	24	0,11	C	4
122	Ar-condicionado 3	0,90	4 ± 2	0,75	0,90	1000	675	484	327	1111	750	3,41	3,41	0	0,94	—	3,6	2,5*	24	0,09	C	4
123	Ar-condicionado 4	0,90	3 ± 1	0,75	0,90	1000	675	484	327	1111	750	3,41	0	3,41	0,94	—	3,6	2,5*	24	0,07	C	4
130	10×TUG 1	0,95	4 ± 2	0,70	0,60	1000	420	329	138	1053	442	3,48	0	0	0,94	—	3,7	2,5*	24	0,15	C	4
131	10×TUG 2	0,95	5 ± 2	0,70	0,60	1000	420	329	138	1053	442	0	3,48	0	0,94	—	3,7	2,5*	24	0,19	C	4
132	10×TUG 3	0,95	6 ± 2	0,70	0,60	1000	420	329	138	1053	442	0	0	3,48	0,94	—	3,7	2,5*	24	0,23	C	4
140	10×Luminárias	1,00	3 ± 1	0,80	0,90	300	216	0	0	300	216	1,70	0	0	0,94	—	1,8	1,5	17,5	0,09	B	2
200	**QS2 – Cozinha e salas**	**0,97**	10 ± 5	—	—	**28990**	**15192**	**4196**	**2435**	**29829**	**15695**	**51,77**	**55,78**	**34,79**	**0,94**	**0,70**	**84,8**	**25**	**101**	**0,31**	**C**	**63**
210	Chuveiro elétrico 1	1,00	6 ± 2	1,00	0,50	5400	2700	0	0	5400	2700	24,55	0	24,55	0,94	—	26,1	4	32	0,59	B	30
211	Chuveiro elétrico 2	1,00	5 ± 2	1,00	0,50	5400	2700	0	0	5400	2700	0	24,55	24,55	0,94	—	26,1	4	32	0,49	B	30
212	Chuveiro elétrico 3	1,00	7 ± 2	1,00	0,50	7400	3700	0	0	7400	3700	33,64	33,64	0	0,94	—	35,8	10	57	0,38	B	40
220	Ar-condicionado 1	0,90	4 ± 2	0,75	0,90	1000	675	484	327	1111	750	0	3,41	3,41	0,94	—	3,6	2,5*	24	0,09	C	4
221	Ar-condicionado 2	0,90	5 ± 2	0,75	0,90	1000	675	484	327	1111	750	3,41	3,41	0	0,94	—	3,6	2,5*	24	0,11	C	4
222	Ar-condicionado 3	0,90	7 ± 2	0,75	0,90	3000	2025	1453	981	3333	2250	10,23	10,23	0	0,94	—	10,9	2,5*	24	0,46	C	16
230	10×TUG 1	0,95	3 ± 1	0,70	0,60	1000	420	329	138	1053	442	0	2,01	2,01	0,94	—	2,1	2,5*	24	0,04	C	4
231	10×TUG 2	0,95	4 ± 1	0,70	0,60	1000	420	329	138	1053	442	2,01	2,01	0	0,94	—	2,1	2,5*	24	0,05	C	4
232	10×TUG 3	0,95	5 ± 2	0,70	0,60	1000	420	329	138	1053	442	2,01	0	2,01	0,94	—	2,1	2,5*	24	0,06	C	4
240	13×Luminárias	1,00	4 ± 1	0,80	0,90	390	281	0	0	390	281	2,21	0	0	0,94	—	2,4	1,5*	17,5	0,16	B	4
250	TUE 1	0,95	3 ± 1	0,70	0,70	1200	588	394	193	1263	619	0	2,81	2,81	0,94	—	3,0	2,5*	24	0,05	C	4
251	TUE 2	0,95	4 ± 1	0,70	0,70	1200	588	394	193	1263	619	2,81	2,81	0	0,94	—	3,0	2,5*	24	0,07	C	4
280	**QS-Bombas**	**0,81**	10 ± 5	—	—	**2250**	**840**	**1649**	**618**	**2790**	**1043**	**3,41**	**0**	**5,71**	**0,94**	**0,80**	**7,6**	2,5*	**24**	**0,36**	**C**	**6**
281	Piscina	0,80	5 ± 2	0,80	0,50⋆	1500	600	1125	450	1875	750	3,41	0	3,41	0,94	—	3,6	2,5*	24	0,11	C	4
282	Caixa d'água	0,82	7 ± 2	0,80	0,40⋆	750	240	524	168	915	293	0	0	2,30	0,71	—	3,2	2,5*	24	0,18	C	4
300	**QS3 – Outras salas**	**0,95**	15 ± 5	—	—	**4400**	**2184**	**1446**	**718**	**4632**	**2299**	**3,22**	**10,31**	**6,83**	**0,94**	**0,70**	**15,7**	**2,5**	**24**	**0,85**	**C**	**16**
310	10×TUG	0,95	5 ± 2	0,70	0,60	1000	420	329	138	1053	442	0	2,01	2,01	0,94	—	2,1	2,5*	24	0,06	C	4
320	10×TUG	0,95	6 ± 2	0,70	0,60	1000	420	329	138	1053	442	0	3,48	0	0,94	—	3,7	2,5*	24	0,23	C	4
330	TUE 1	0,95	3 ± 1	0,70	0,80	600	336	197	110	632	354	0	1,61	1,61	0,94	—	1,7	2,5*	24	0,03	C	2
331	TUE 2	0,95	4 ± 1	0,70	0,80	600	336	197	110	632	354	1,61	1,61	0	0,94	—	1,7	2,5*	24	0,04	C	2
332	TUE 3	0,95	5 ± 2	0,70	0,80	600	336	197	110	632	354	1,61	0	1,61	0,94	—	1,7	2,5*	24	0,05	C	2
333	TUE 4	0,95	6 ± 2	0,70	0,80	600	336	197	110	632	354	0	1,61	1,61	0,94	—	1,7	2,5*	24	0,06	C	2
400	**QS4 – Segundo andar**	**0,94**	20 ± 5	—	—	**6360**	**3597**	**1489**	**947**	**6686**	**3807**	**10,65**	**8,22**	**15,68**	**0,87**	**0,80**	**22,5**	**4**	**32**	**1,08**	**C**	**16**
410	Ar-condicionado	0,90	7 ± 2	0,75	0,90	2600	1755	1259	850	2889	1950	8,86	0	8,86	0,87	—	10,2	2,5*	24	0,39	C	10
420	Boiler resistivo	1,00	6 ± 2	1,00	0,50⋆	3000	1500	0	0	3000	1500	0	6,82	6,82	0,87	—	7,8	2,5*	24	0,26	B	10
430	7×TUG	0,95	5 ± 2	0,70	0,60	700	294	230	97	737	309	1,41	1,41	0	0,87	—	1,6	2,5*	24	0,04	C	2
440	2×Luminárias	1,00	2 ± 1	0,80	1,00	60	48	0	0	60	48	0,38	0	0	0,87	—	0,4	1,5	17,5	0,01	B	2
500	**QS5 – Terceiro andar**	**0,95**	25 ± 5	**1,00**	**0,50**	**2000**	**1000**	**657**	**329**	**2105**	**1053**	**4,78**	**4,78**	**0**	**0,71**	**0,80**	**8,4**	2,5*	**24**	**0,76**	**C**	**6**
600	**QS-Reserva 1**	**1,00**	10 ± 5	—	**0,50**	**800**	**400**	**0**	**0**	**800**	**400**	**1,05**	**1,05**	**1,05**	**0,94**	**0,80**	**1,4**	2,5*	**24**	**0,06**	**C**	**2**
700	**QS-Reserva 2**	**1,00**	10 ± 5	—	**0,50**	**800**	**400**	**0**	**0**	**800**	**400**	**1,05**	**1,05**	**1,05**	**0,94**	**0,80**	**1,4**	2,5*	**24**	**0,06**	**C**	**2**

Nota: A coluna $f_{s|c}$ reúne o fator de simultaneidade f_s e o fator de ciclo de serviço f_c; nesta coluna os valores assinalados por "⋆" correspondem ao uso de f_c, e não de f_s. Nos circuitos terminais dos chuveiros elétricos, o valor $f_{s|c} = 0{,}50$ foi mantido apenas para a estimativa de demanda do quadro de distribuição. O sobrescrito "$*$" indica que a seção transversal preliminar do condutor foi governada por critério mínimo normativo ou prático, e não apenas pela capacidade de condução calculada. A coluna I_Z apresenta a capacidade de condução de corrente associada à seção A_{pre}, antes da aplicação dos fatores de correção.

As colunas da Tabela 11.5 apresentam os principais parâmetros do dimensionamento preliminar de condutores e dispositivos de proteção. Como a descrição completa das modificações e dos detalhes não pode ser incluída na nota de rodapé da tabela, esses aspectos são expostos a seguir de forma didática.

- **Correntes e fatores de correção.** A coluna I'_B corresponde à maior corrente de fase, $\max\{I_{B,\mathbf{S}},\ I_{B,\mathbf{R}},\ I_{B,\mathbf{T}}\}$, dividida pelos fatores de correção aplicáveis. Adotaram-se fatores de temperatura $\mathrm{f}_t = 0{,}94$, $0{,}87$ e $0{,}71$, conforme a condição térmica considerada para cada pavimento. O fator de agrupamento f_g foi indicado nas linhas dos quadros de distribuição; quando aparece como "—", considera-se $\mathrm{f}_g = 1{,}00$.
- **Proteção e curva de disparo.** A coluna I_n apresenta uma corrente nominal preliminar do dispositivo de proteção, a ser confirmada na etapa de coordenação proteção-condutor. A coluna *CD* indica a curva de disparo: curva B para cargas predominantemente resistivas ou de baixa corrente de partida, e curva C para tomadas, motores, condicionadores de ar, cargas com partida moderada e alimentadores.
- **Queda de potencial elétrico.** A coluna δ_V apresenta a queda relativa de potencial elétrico, em porcentagem, calculada com $\rho = 0{,}0175\ [\Omega \cdot \mathrm{mm}^2/\mathrm{m}]$, o comprimento médio Δl e a seção A_{pre}. Foram adotadas as diferenças de potencial de $127\ [\mathrm{V}]$ para circuitos fase-neutro e $220\ [\mathrm{V}]$ para circuitos fase-fase e alimentadores.
- **Quadros subordinados.** Nesta versão, o QS-Bombas é tratado como quadro eletricamente independente, alimentado diretamente pelo QGBT, embora possa estar fisicamente alojado junto ao QS2.
- **Interpretação dos subtotais.** As linhas dos circuitos terminais representam correntes de projeto, enquanto as linhas dos quadros representam correntes de demanda dos alimentadores. Por isso, os subtotais dos quadros não precisam coincidir com a soma direta das correntes plenas dos circuitos terminais.

Os valores de I_n, A_{pre}, I_Z e δ_V são preliminares e não substituem a verificação final pelo método de instalação, pela capacidade de condução tabelada, pela coordenação com o dispositivo de proteção, pela corrente convencional de atuação e pela queda de potencial elétrico admissível. Assim, a tabela deve ser interpretada como uma ponte entre o cálculo de demanda, desenvolvido no Capítulo 10, e o dimensionamento dos condutores apresentado neste capítulo, organizando os dados necessários para as verificações posteriores sem encerrar o processo de projeto.

No Capítulo 12, esses resultados serão retomados para a verificação final pelo método de instalação, pela capacidade de condução de corrente tabelada, pela coordenação com o dispositivo de proteção e pela corrente convencional de atuação. Assim, o presente capítulo concentra-se apenas na seleção preliminar das seções dos condutores.

11.3 Resumo do capítulo

Neste capítulo, foi apresentado o dimensionamento preliminar de condutores em instalações elétricas de baixa tensão. A seção dos condutores foi tratada como resultado de um processo multicritério, no qual devem ser considerados a corrente de projeto, a capacidade de condução de corrente, os fatores de correção, a queda de potencial elétrico, as seções mínimas normativas e o condutor de proteção **PE**.

Foi mostrado que a corrente de projeto I_B é o ponto de partida do dimensionamento, mas que as condições reais de instalação podem exigir a utilização de uma corrente corrigida de seleção I'_B. Temperatura ambiente elevada, agrupamento de circuitos e condições desfavoráveis de dissipação térmica reduzem a capacidade admissível dos condutores e podem exigir o aumento da seção transversal adotada.

Também foi discutido que a queda de potencial elétrico pode se tornar determinante em circuitos longos ou em cargas de maior potência, especialmente quando o percurso aumenta a resistência elétrica total do circuito. Por isso, a seção final não deve ser escolhida apenas pela corrente da carga, mas pela combinação entre capacidade térmica, queda de potencial elétrico, seção mínima normativa e compatibilidade preliminar com o sistema de proteção.

Por fim, foi introduzido o dimensionamento do condutor de proteção **PE** e foi apresentado um estudo de caso mais realista, no qual os dados de demanda, corrente corrigida, seção preliminar, queda de potencial elétrico e proteção preliminar foram organizados em uma tabela integrada. Essa tabela encerra a etapa de dimensionamento preliminar, evidencia a relação entre os critérios estudados e prepara a continuidade do estudo, que será realizada no capítulo seguinte por meio da verificação final dos condutores e dispositivos de proteção.

Capítulo 12

Verificação de condutores e dispositivos de proteção

12.1 Introdução

No Capítulo 11, foi realizado o dimensionamento preliminar dos condutores a partir da corrente de projeto, dos fatores de correção, da queda de potencial elétrico, das seções mínimas normativas e do condutor de proteção **PE**. Essa etapa permitiu obter uma primeira seleção de seções e dispositivos de proteção, organizada na Tabela 11.5. Entretanto, a seleção preliminar ainda não encerra o processo de projeto.

Neste capítulo, os resultados preliminares são retomados para verificar se condutores e dispositivos de proteção permanecem compatíveis nas condições finais de instalação. O foco deixa de ser a determinação inicial da seção e passa à verificação conjunta entre método de instalação, capacidade de condução tabelada, fatores de correção, corrente nominal do dispositivo, corrente convencional de atuação, curva de disparo e capacidade de interrupção.

A proteção elétrica não deve ser escolhida isoladamente. O dispositivo deve permitir a operação normal da carga, proteger o condutor contra sobrecargas, atuar em curto-circuito e ter capacidade de interrupção compatível com a corrente de falta presumida no ponto de instalação. Por isso, a seleção do disjuntor deve ser analisada em conjunto com o condutor, e não apenas pela potência nominal da carga.

! Importante

Verificação final: A verificação final não invalida o dimensionamento preliminar. Ela confirma se a seção escolhida permanece adequada quando são aplicados o método de instalação, a capacidade de condução tabelada, os fatores de correção e a coordenação com o dispositivo de proteção. Quando alguma condição não é atendida, a seção do condutor, a corrente nominal do dispositivo ou a forma de instalação devem ser revistos.

O objetivo deste capítulo é apresentar um procedimento prático de verificação de condutores e dispositivos de proteção em instalações de baixa tensão. Para isso, serão utilizados os dados do estudo de caso iniciado no capítulo anterior, evitando a repetição dos cálculos de demanda e concentrando a análise na compatibilidade final entre condutores, disjuntores e condições de instalação.

12.2 Desenvolvimento teórico

A verificação de condutores e dispositivos de proteção deve ser entendida como uma etapa de integração do projeto. Os capítulos anteriores forneceram os dados de entrada: o levantamento de cargas, o quadro de cargas, o cálculo de demanda, a corrente de projeto e a seção preliminar dos condutores. Nesta etapa, esses dados são confrontados com as condições reais ou assumidas de instalação.

Em termos práticos, o problema consiste em responder à seguinte pergunta: a seção preliminar escolhida no Capítulo 11 continua adequada quando são aplicados o método de instalação, a capacidade de condução tabelada, os fatores de correção e as características do dispositivo de proteção? Caso a resposta seja negativa, deve-se ajustar a seção, o dispositivo de proteção ou as condições de instalação.

12.2.1 Método de instalação

O método de instalação descreve a forma física pela qual os condutores são dispostos na edificação ou no ambiente de uso. Essa escolha não depende apenas da corrente da carga, mas de condições construtivas, mecânicas, arquitetônicas e normativas. Entre os aspectos relevantes, podem ser citados o tipo de parede, a existência de shafts, a passagem em eletrodutos embutidos ou aparentes, o uso de eletrocalhas, bandejas, leitos, canaletas, linhas subterrâneas, proteção contra impactos, facilidade de manutenção e requisitos locais de segurança.

Por esse motivo, a escolha completa do método de instalação foge parcialmente ao escopo deste livro. O objetivo aqui não é projetar a infraestrutura civil ou mecânica da instalação, mas mostrar como essa escolha interfere no dimensionamento elétrico dos condutores. Em outras palavras, o método de instalação define a capacidade de dissipação térmica do cabo e, consequentemente, influencia a capacidade de condução de corrente.

A **ABNT NBR 5410** organiza, na **Tabela 33**, os "Tipos de linhas elétricas" usando um "número" como nomenclatura de identificação de mais de quarenta métodos de instalação distintos, incluindo subvariantes. Cada método descreve uma situação construtiva específica, como condutores em eletroduto embutido, cabos em canaletas, cabos diretamente fixados, condutores em eletrocalhas, linhas enterradas ou cabos instalados ao ar livre. A partir desse método numerado, a norma indica um "método de referência", como A1, A2, B1, B2, C, D, E, F ou G, utilizado posteriormente na consulta das tabelas de capacidade de condução de corrente (ABNT NBR 5410, 2004).

De forma geral, os métodos de referência podem ser interpretados segundo a condição de dissipação térmica predominante e segundo a quantidade de condutores de cobre carregados. A seguir, são apresentadas interpretações didáticas para os métodos de referência utilizados como referência normativa:

- **A1 e A2:** Representam instalações em condições de dissipação térmica restritivas, como condutores ou cabos associados a paredes termicamente isolantes. A troca de calor com o ambiente é menor, reduzindo a capacidade admissível do condutor. Na consulta das tabelas, deve-se distinguir se o circuito possui dois ou três condutores carregados.
- **B1 e B2:** Representam instalações em eletrodutos fechados, embutidos ou aparentes, nas quais a dissipação térmica é limitada pelo confinamento dos condutores. O método B1 é usualmente associado a condutores isolados em eletroduto, enquanto o método B2 se refere a cabos em condição semelhante. Nesses métodos, a quantidade de condutores carregados no eletroduto ou conduto influencia diretamente a capacidade admissível, pois mais condutores dissipam calor no mesmo espaço e elevam a temperatura interna da linha elétrica.
- **C:** Representa situações com melhor dissipação térmica, como cabos instalados de forma mais exposta, fixados a superfícies ou em condições nas quais o calor pode ser transferido ao ambiente com menor restrição. Mesmo com melhor ventilação, deve-se verificar se há dois ou três condutores carregados, pois mais condutores percorridos por corrente aumentam a geração de calor.
- **D:** Representa linhas enterradas, nas quais a dissipação térmica depende fortemente das condições do solo, da profundidade, da resistividade térmica e da forma de instalação. Nesse caso, além da quantidade de condutores carregados, a proximidade entre cabos ou circuitos enterrados pode reduzir a dissipação de calor e exigir aplicação de fatores de correção específicos.
- **E, F e G:** Representam instalações com cabos ao ar livre ou em arranjos mais ventilados, como bandejas, leitos ou disposições equivalentes. Em geral, favorecem a dissipação térmica quando comparadas a eletrodutos fechados, embora ainda dependam do agrupamento e da disposição física dos cabos. Nesses métodos, a quantidade de condutores carregados deve ser analisada com o arranjo dos cabos, pois cabos multipolares, unipolares agrupados e espaçados podem apresentar capacidades de condução diferentes.

Nota

Método de referência: O método numerado identifica a situação construtiva específica da linha elétrica. O método de referência, por sua vez, agrupa situações térmicas equivalentes para consulta das tabelas de capacidade de condução de corrente. Assim, a consulta deve começar pela identificação do método de instalação na **Tabela 33** da **ABNT NBR 5410** e seguir para a tabela de capacidade correspondente ao método de referência indicado.

O condutor neutro pode precisar ser considerado como condutor carregado quando houver desequilíbrio significativo ou presença relevante de correntes harmônicas, especialmente harmônicas triplas.

Desambiguação

Condutores carregados: Quando se afirma que os condutores são de cobre, em instalações elétricas de baixa tensão, normalmente considera-se o uso de cobre eletrolítico de alta condutividade, geralmente recozido, nu ou estanhado, conforme a construção do cabo. Essa definição inclui condutores rígidos, encordoados, compactados ou flexíveis, desde que atendam aos requisitos normativos de resistência elétrica, classe de encordoamento, isolação e capacidade de condução de corrente. Em situações específicas, também podem ser utilizados condutores de alumínio ou de liga de alumínio, desde que previstos no projeto, compatíveis com os dispositivos de conexão e dimensionados pelas tabelas correspondentes ao material adotado.

Aviso

Não condutor: A expressão "condutor de cobre" não deve ser interpretada como autorização para utilizar qualquer liga que contenha cobre em sua composição. Materiais como latão, bronze, cobre-berílio, cobre-cromo-zircônio, cupro-níquel ou outras ligas especiais podem ter boas propriedades mecânicas, resistência à corrosão ou aplicações industriais específicas, mas não correspondem automaticamente aos condutores de cobre considerados nas tabelas usuais de instalações elétricas. Essas ligas possuem resistividade, comportamento térmico e finalidade diferentes, podendo comprometer a capacidade de condução de corrente, a queda de potencial elétrico, a compatibilidade com conexões e a segurança da instalação.

Saiba Mais

Cobre de grau elétrico: O cobre eletrolítico é obtido por processos de refino destinados a elevar a pureza do metal e, consequentemente, sua condutividade elétrica. De forma simplificada, no eletrorefino, íons de cobre em solução recebem elétrons e se depositam como cobre metálico no cátodo:

$$\mathrm{Cu}^{2+} + 2\,\mathrm{e}^{-} \longrightarrow \mathrm{Cu}\,(\mathrm{s}).$$

Do ponto de vista metalúrgico, o recozimento reduz os efeitos do encruamento produzido durante trefilação ou conformação mecânica, tornando o condutor mais dúctil e adequado à fabricação de fios e cabos. A elevada pureza do cobre favorece baixa resistividade elétrica, enquanto impurezas, fases secundárias ou elementos de liga tendem a aumentar a resistência elétrica e alterar o comportamento térmico do material. Por isso, em instalações de baixa tensão, o interesse principal não é apenas que o material contenha Cu, mas que possua composição, pureza, tratamento metalúrgico e características elétricas compatíveis com os condutores normatizados.

No cenário didático adotado neste capítulo, considera-se que os condutores sejam de cobre eletrolítico, com isolação em PVC, para temperatura máxima de serviço de $70\,[^{\circ}\mathrm{C}]$. Conforme o tipo de circuito analisado, adotam-se os métodos de instalação ou de referência A1, B1 e C: A1 para circuitos de ar-condicionado, B1 para circuitos usuais em eletroduto e alimentadores, e C para circuitos de iluminação. Para circuitos fase-neutro e fase-fase, consideram-se dois condutores carregados; para alimentadores trifásicos dos quadros, três condutores carregados.

12.2.2 Capacidade de condução tabelada

Depois de identificado o método de instalação, deve-se consultar a capacidade de condução de corrente do condutor. Essa capacidade será representada por $I_{Z,\text{tab}}$, indicando o valor obtido diretamente na tabela normativa, antes da aplicação dos fatores de correção.

A consulta de $I_{Z,\text{tab}}$ deve considerar, simultaneamente, os seguintes dados:

- Material do condutor, como cobre ou alumínio;
- Tipo de isolação, como PVC, EPR ou XLPE;
- Temperatura máxima de serviço da isolação;
- Método de referência, obtido a partir do método de instalação;
- Número de condutores carregados;
- Seção nominal do condutor.

Para condutores com isolação em PVC, temperatura máxima de serviço de $70\,[°\text{C}]$, usam-se as tabelas normativas correspondentes a essa isolação, como as **Tabelas 36** e **38** da **ABNT NBR 5410**, conforme o grupo de métodos de referência. Para condutores com isolação em EPR ou XLPE, temperatura máxima de serviço de $90\,[°\text{C}]$, usam-se as tabelas correspondentes a essa condição, como as **Tabelas 37** e **39**. Os fatores de correção por temperatura ambiente são obtidos na **Tabela 40**, enquanto os fatores de correção por agrupamento são obtidos nas **Tabelas 42 a 45**, conforme a forma de agrupamento e a maneira de instalar (ABNT NBR 5410, 2004).

Aviso

Tabela adequada: A capacidade de condução de corrente não deve ser lida em uma tabela genérica. Dois condutores com a mesma seção transversal podem possuir capacidades admissíveis diferentes se forem instalados por métodos diferentes, com isolações diferentes ou com números distintos de condutores carregados.

O valor $I_{Z,\text{tab}}$ representa a capacidade de condução nas condições de referência da tabela. Quando as condições reais diferem dessas condições, devem ser aplicados os fatores de correção correspondentes. Considerando os fatores introduzidos no Capítulo 11, pode-se escrever:

$$I_Z = I_{Z,\text{tab}} \cdot \mathrm{f}_t \cdot \mathrm{f}_g \cdot \mathrm{f}_{\rho s} \cdot \mathrm{f}_h, \tag{12.1}$$

onde:

- I_Z é a capacidade de condução de corrente corrigida do condutor $[\text{A}]$;
- $I_{Z,\text{tab}}$ é a capacidade de condução de corrente obtida na tabela normativa $[\text{A}]$;
- f_t é o fator de correção por temperatura ambiente;
- f_g é o fator de correção por agrupamento de circuitos;
- $\mathrm{f}_{\rho s}$ é o fator associado à resistividade térmica do solo, quando aplicável;
- f_h é o fator associado à presença de correntes harmônicas, quando aplicável.

Quando algum fator não for aplicável ao circuito analisado, adota-se valor igual à unidade para esse fator. Por exemplo, em uma instalação não enterrada, pode-se usar $\mathrm{f}_{\rho s} = 1$; em um circuito sem presença relevante de harmônicas, pode-se usar $\mathrm{f}_h = 1$. O produto desses fatores pode ser entendido como um “efeito combinado de correção”, mas neste capítulo a capacidade corrigida será escrita explicitamente pelo produto dos fatores aplicáveis.

Também é possível usar a mesma relação de forma inversa. Se a corrente mínima corrigida exigida pelo circuito for conhecida, a capacidade tabelada mínima pode ser estimada por:

$$I_{Z,\text{tab}} \geq \frac{I_{\text{req}}}{\mathrm{f}_t \cdot \mathrm{f}_g \cdot \mathrm{f}_{\rho s} \cdot \mathrm{f}_h}, \tag{12.2}$$

em que I_{req} representa a corrente mínima que o condutor deve suportar após consideradas as condições de projeto. Dependendo da verificação em andamento, I_{req} pode ser a corrente de projeto I_B, a corrente nominal do dispositivo de proteção I_n ou a corrente exigida pela condição convencional de atuação.

Nota

Sentido da correção: Os fatores de correção reduzem a capacidade admissível do condutor quando as condições reais são mais desfavoráveis que as condições de referência da tabela. Por isso, eles multiplicam $I_{Z,\text{tab}}$ para obter I_Z, mas aparecem no denominador quando se deseja calcular a capacidade tabelada mínima necessária.

12.2.3 Capacidade de interrupção e curto-circuito

A verificação contra sobrecarga não basta para validar a seleção do dispositivo de proteção. Também é necessário verificar se o disjuntor possui capacidade de interrupção compatível com a corrente de curto-circuito presumida, pois, durante uma falta, a corrente pode atingir valores muito superiores à corrente normal de operação.

O curto-circuito é uma falta caracterizada por corrente elevada, geralmente causada por impedância muito baixa entre condutores ativos ou entre condutor ativo e massa. Ao contrário da sobrecarga, que pode evoluir gradualmente, o curto-circuito tende a ocorrer de forma abrupta e pode produzir aquecimento intenso, arco elétrico, esforços eletrodinâmicos, queda acentuada da diferença de potencial elétrico e danos em conexões, barramentos e equipamentos.

Em uma análise simplificada, a corrente de curto-circuito presumida pode ser modelada pela seguinte equação:

$$V_{\text{falta}} = I_{cc} \cdot |Z_{cc}|, \tag{12.3}$$

onde:

- I_{cc} é a corrente de curto-circuito presumida [A];
- V_{falta} é a diferença de potencial elétrico aplicada ao percurso da falta [V];
- Z_{cc} é a impedância equivalente do circuito de falta [Ω].

A grandeza V_{falta} depende do tipo de falta analisada. Em uma falta fase-neutro, pode-se usar a diferença de potencial de fase V_F. Em uma falta fase-fase, usa-se a diferença de potencial entre fases V_L. Em uma falta trifásica equilibrada, usa-se a diferença de potencial de linha, V_L, no ponto analisado. A escolha correta depende do sistema de alimentação e do tipo de curto-circuito que se deseja avaliar.

A impedância equivalente do circuito de falta pode ser representada, de forma simplificada, por:

$$Z_{cc} = Z_{\text{fonte}} + Z_{\text{trafo}} + Z_{\text{alimentador}} + Z_{\text{circuito}} + Z_{\text{conexoes}}. \tag{12.4}$$

Nessa expressão, as impedâncias representam, respectivamente: a impedância do sistema a montante, a impedância do transformador, a impedância dos condutores até o quadro alimentador analisado, a impedância do circuito final até o ponto de falta, e a aproximação das impedâncias de barramentos, bornes, emendas e conexões.

Nota

Corrente máxima e corrente mínima de curto-circuito: Em projeto, podem ser analisadas duas situações distintas. A corrente máxima de curto-circuito, $I_{cc,\text{max}}$, ocorre normalmente perto da fonte ou do quadro principal, onde a impedância do percurso é menor. Ela é usada para verificar a capacidade de interrupção e os esforços térmicos e eletrodinâmicos. A corrente mínima de curto-circuito, $I_{cc,\text{min}}$, ocorre em pontos mais distantes, onde a impedância dos condutores é maior. Ela é usada para verificar se o dispositivo de proteção ainda atua dentro do tempo admissível.

Definição

Capacidade de interrupção: É a máxima corrente de curto-circuito, $I_{cc,\max}$, que o dispositivo de proteção pode interromper de forma segura, na diferença de potencial elétrico especificada, sem sofrer danos incompatíveis com sua especificação e sem comprometer a segurança da instalação.

Em catálogos técnicos, a capacidade de interrupção pode aparecer associada a diferentes símbolos. Em disjuntores de uso doméstico ou análogo, pode aparecer a "capacidade nominal de interrupção", frequentemente indicada por I_{cn}. Em disjuntores industriais, aparecem grandezas como "capacidade última de interrupção" I_{cu} e "capacidade de interrupção em serviço" I_{cs}. A notação depende do tipo de dispositivo e da norma de fabricação aplicável.

Para fins didáticos, será usada a notação genérica I_c para representar a capacidade de interrupção máxima do dispositivo. A condição básica de verificação é:

$$I_c \geq I_{cc,\max}. \tag{12.5}$$

Essa condição indica que o disjuntor deve ser capaz de interromper a maior corrente de curto-circuito presumida no ponto em que está instalado. Por exemplo, se em determinado quadro for estimada uma corrente de curto-circuito máxima de $4{,}5\,[\text{kA}]$, um disjuntor com capacidade de interrupção de $3\,[\text{kA}]$ não deve ser utilizado. Um dispositivo com capacidade de interrupção de $6\,[\text{kA}]$ poderia ser aceitável quanto a esse critério, desde que as demais verificações também sejam atendidas.

Aviso

Corrente nominal e capacidade de interrupção: A corrente nominal do disjuntor não informa, por si só, sua capacidade de interromper curto-circuitos. Dois disjuntores com a mesma corrente nominal, como por exemplo $I_n = 20\,[\text{A}]$, podem possuir capacidades de interrupção diferentes, como $3\,[\text{kA}]$, $6\,[\text{kA}]$, $10\,[\text{kA}]$ ou valores superiores. Por isso, a capacidade de interrupção deve ser verificada separadamente.

Além de interromper a falta, o dispositivo deve atuar em tempo suficientemente curto para evitar danos térmicos ao condutor. Em uma verificação simplificada de suportabilidade térmica, pode-se usar o critério adiabático:

$$I_{cc}^2 \cdot t_a \leq k^2 \cdot A^2, \tag{12.6}$$

onde:

- I_{cc} é a corrente de curto-circuito eficaz considerada $[\text{A}]$;
- t_a é o tempo de atuação do dispositivo de proteção $[\text{s}]$;
- A é a seção transversal do condutor $[\text{mm}^2]$;
- k é um coeficiente dependente do material do condutor, do tipo de isolação e das temperaturas admissíveis.

De forma equivalente, o tempo máximo admissível pode ser escrito como:

$$t_{a,\max} = \left(\frac{k \cdot A}{I_{cc}}\right)^2. \tag{12.7}$$

Esse resultado mostra que, para uma mesma corrente de curto-circuito, condutores de maior seção suportam a falta por mais tempo. Por outro lado, para uma mesma seção, correntes de curto-circuito mais elevadas exigem atuação mais rápida do dispositivo de proteção.

Importante

Duas verificações diferentes: A *capacidade de interrupção* verifica se o disjuntor consegue abrir o curto-circuito sem falhar. A *suportabilidade térmica* verifica se o condutor suporta a energia térmica até a abertura do circuito. Portanto, um dispositivo pode ter capacidade de interrupção suficiente e ainda assim exigir verificação do tempo de atuação.

A corrente mínima de curto-circuito também deve ser analisada. Em circuitos longos, a impedância dos condutores pode reduzir a corrente de falta a um valor que não acione rapidamente a parte magnética do disjuntor. Nesses casos, a verificação pode ser expressa por:

$$t_{\text{adm}} \geq t_{\text{disp}}, \quad t_{\text{disp}} = \mathcal{F}(I_{cc,\text{min}}), \tag{12.8}$$

em que t_{disp} é o tempo de atuação do dispositivo para a corrente mínima de curto-circuito presumida, e t_{adm} é o tempo máximo admissível para a condição analisada.

Em projetos completos, a avaliação de curto-circuito considera a energia passante do dispositivo, as curvas tempo-corrente, a seletividade, a diferença de potencial elétrico de operação, a categoria do disjuntor e as condições do quadro. Neste escopo, a análise é introdutória, apenas para mostrar que a proteção não deve ser escolhida só por I_n.

12.2.4 Escolha da curva de disparo

As curvas de disparo já foram introduzidas no Capítulo 6. Neste capítulo, a curva será tratada como critério de seleção. A pergunta principal deixa de ser "o que é uma curva de disparo" e passa a ser: qual curva permite a partida ou energização normal da carga e, ao mesmo tempo, garante atuação adequada em caso de falta?

A escolha da curva depende de dois grupos de informações:

- Comportamento transitório da carga, especialmente corrente de partida, de magnetização ou de energização;
- Corrente de curto-circuito presumida no ponto de instalação, principalmente a corrente mínima de curto-circuito.

Para disjuntores termomagnéticos usuais, a atuação magnética instantânea pode ser representada, de forma simplificada, por uma faixa multiplicativa da corrente nominal: $I_m = m \cdot I_n$, em que I_m é a corrente associada à atuação magnética, I_n é a corrente nominal do disjuntor e m é um multiplicador definido pela curva do dispositivo. A Tabela 6.1 apresenta, para as curvas A, B, C e D, intervalos típicos de multiplicadores de atuação magnética, no formato $\{m_{\text{min}}, m_{\text{max}}\}$, isto é: A $\{2, 3\}$, B $\{3, 5\}$, C $\{5, 10\}$ e D $\{10, 20\}$.

Nota

Condição 1. Evitar atuação indevida na partida. A corrente transitória da carga deve permanecer abaixo do limiar inferior da atuação magnética:

$$I_{\text{partida}} < m_{\text{min}} \cdot I_n. \tag{12.9}$$

Assim, a curva escolhida não deve atuar durante a partida normal. A curva A será usada apenas como referência comparativa, por ser muito sensível para aplicações usuais de baixa tensão. Em cargas com maior corrente transitória, uma curva C ou D pode ser necessária, desde que a proteção contra curto-circuito continue adequada.

Condição 2. Garantir atuação rápida em curto-circuito. No ponto mais desfavorável do circuito, a corrente mínima de curto-circuito deve superar o limite superior da faixa magnética:

$$I_{cc,\text{min}} > m_{\text{max}} \cdot I_n. \tag{12.10}$$

Desse modo, mesmo considerando tolerâncias do dispositivo, a falta produzirá corrente suficiente para acionar a região instantânea do disjuntor.

Importante

Critério: A curva deve ser permissiva o suficiente para não atuar durante a partida normal da carga, mas sensível o suficiente para atuar rapidamente em caso de falta. A escolha correta depende simultaneamente de I_{partida}, I_n e $I_{cc,\text{min}}$.

Quando as Equações 12.9 e 12.10 não puderem ser atendidas simultaneamente, deve-se consultar a curva tempo-corrente do fabricante. Nesse caso, a verificação passa a ser feita por tempo de atuação:

- $t_{\text{partida}} < t_{\text{disp}}$, com $t_{\text{disp}} = \mathcal{F}(I_{\text{partida}})$, para evitar desligamento indevido durante a partida;
- $t_{\text{adm}} \geq t_{\text{disp}}$, com $t_{\text{disp}} = \mathcal{F}(I_{cc,\text{min}})$, para garantir desligamento dentro do tempo admissível.

Na prática, recomenda-se escolher a curva menos permissiva que satisfaça simultaneamente as condições de partida e de curto-circuito. Assim, evita-se usar uma curva D quando uma curva C é suficiente, ou uma curva C quando uma curva B atende ao comportamento da carga. Essa escolha melhora a sensibilidade da proteção e reduz o risco de manter faltas de menor corrente por tempo excessivo.

Nota

Escolha preliminar: Em circuitos predominantemente resistivos e com baixa corrente de energização, a curva B pode ser suficiente. Em circuitos de tomadas, pequenos motores, condicionadores de ar, bombas e alimentadores, a curva C costuma ser analisada como alternativa inicial. Em cargas com corrente de partida ou magnetização elevada, a curva D pode ser necessária, mas deve ser confirmada pela corrente de curto-circuito disponível e pela curva tempo-corrente.

Aviso

Curva excessivamente permissiva: Uma curva mais permissiva pode evitar desligamentos indevidos na partida, mas exige maior corrente de curto-circuito para atuação instantânea. Por isso, deve ser compatível com a corrente de partida e com a corrente mínima de curto-circuito no ponto.

12.2.5 Procedimento de verificação

A verificação final dos condutores e dispositivos de proteção pode ser organizada como uma sequência de testes técnicos. Essa sequência permite identificar se a seção preliminar escolhida no Capítulo 11 deve ser ajustada.

O procedimento adotado neste capítulo é o seguinte:

1. Retomar a corrente de projeto I_B do circuito terminal ou a corrente de demanda do alimentador.
2. Identificar o método de instalação e o método de referência correspondente.
3. Definir os condutores carregados e consultar $I_{Z,\text{tab}}$ para a seção preliminar.
4. Aplicar os fatores de correção necessários, calculando: $I_Z = I_{Z,\text{tab}} \cdot \text{f}_t \cdot \text{f}_g \cdot \text{f}_{\rho s} \cdot \text{f}_h$.
5. Aplicar os critérios de coordenação proteção-condutor apresentados no Capítulo 11.
6. Verificar se a curva de disparo é compatível com a corrente de partida ou energização da carga.
7. Verificar se a curva de disparo é compatível com a corrente mínima de curto-circuito presumida.
8. Verificar a capacidade de interrupção frente a $I_{cc,\text{max}}$.
9. Revisar condutor, proteção, curva ou método quando alguma condição falhar.

A Tabela 12.1 apresenta a verificação final dos condutores e dispositivos de proteção do estudo de caso, consolidando os resultados obtidos nas etapas anteriores. Nesta fase, deixam de ser destacados os parâmetros de potência e demanda, já utilizados na determinação das correntes de projeto, e passa-se à verificação pré-instalação.

O foco agora é a compatibilidade entre I_B, seções preliminar e final, método de instalação, capacidade tabelada, fatores de correção, e as correntes, curvas e capacidades da proteção.

Tabela 12.1: Verificação final por capacidade de condução, método de instalação e proteção

k	Carga	cos ϕ	P [W]	MI	n_c	$I_{B,\mathrm{R}}$ [A]	$I_{B,\mathrm{S}}$ [A]	$I_{B,\mathrm{T}}$ [A]	A_{pre} [mm^2]	A_{final} [mm^2]	$I_{Z,\mathrm{tab}}$ [A]	f_t	f_g	I_Z [A]	I_n [A]	CD	α_2	I_2 [A]	Verif.
000	**QGBT**	**0,96**	**63700**	**B1**	**3**	**103,61**	**103,78**	**103,37**	**50**	**50**	**134**	**0,94**	**—**	**126,0**	**125**	**C**	**1,42**	**177,5**	**OK**
100	**QS1 – Dormitórios**	**0,96**	**18100**	**B1**	**3**	**27,68**	**22,57**	**38,25**	**16**	**16**	**68**	**0,94**	**0,70**	**44,7**	**40**	**C**	**1,40**	**56,0**	**OK**
110	Chuveiro elétrico 1	1,00	5400	A2	2	24,55	0	24,55	4	6	32	0,94	—	30,1	30	B	1,45	43,5	OK
111	Chuveiro elétrico 2	1,00	5400	A2	2	0	24,55	24,55	4	6	32	0,94	—	30,1	30	B	1,45	43,5	OK
120	Ar-condicionado 1	0,90	1000	A1	2	3,41	0	3,41	2,5	2,5	19,5	0,94	—	18,3	4	C	1,40	5,6	OK
121	Ar-condicionado 2	0,90	1000	A1	2	0	3,41	3,41	2,5	2,5	19,5	0,94	—	18,3	4	C	1,40	5,6	OK
122	Ar-condicionado 3	0,90	1000	A1	2	3,41	3,41	0	2,5	2,5	19,5	0,94	—	18,3	4	C	1,40	5,6	OK
123	Ar-condicionado 4	0,90	1000	A1	2	3,41	0	3,41	2,5	2,5	19,5	0,94	—	18,3	4	C	1,40	5,6	OK
130	10×TUG 1	0,95	1000	B1	2	3,48	0	0	2,5	2,5	24	0,94	—	22,6	4	C	1,40	5,6	OK
131	10×TUG 2	0,95	1000	B1	2	0	3,48	0	2,5	2,5	24	0,94	—	22,6	4	C	1,40	5,6	OK
132	10×TUG 3	0,95	1000	B1	2	0	0	3,48	2,5	2,5	24	0,94	—	22,6	4	C	1,40	5,6	OK
140	10×Luminárias	1,00	300	C	2	1,70	0	0	1,5	1,5	19,5	0,94	—	18,3	2	B	1,35	2,7	OK
200	**QS2 – Cozinha e salas**	**0,97**	**28990**	**B1**	**3**	**51,77**	**55,78**	**34,79**	**25**	**35**	**110**	**0,94**	**0,70**	**72,4**	**63**	**C**	**1,42**	**89,5**	**OK**
210	Chuveiro elétrico 1	1,00	5400	A2	2	24,55	0	24,55	4	6	32	0,94	—	30,1	30	B	1,45	43,5	OK
211	Chuveiro elétrico 2	1,00	5400	A2	2	0	24,55	24,55	4	6	32	0,94	—	30,1	30	B	1,45	43,5	OK
212	Chuveiro elétrico 3	1,00	7400	A2	2	33,64	33,64	0	10	10	43	0,94	—	40,4	40	B	1,45	58,0	OK
220	Ar-condicionado 1	0,90	1000	A1	2	0	3,41	3,41	2,5	2,5	19,5	0,94	—	18,3	4	C	1,40	5,6	OK
221	Ar-condicionado 2	0,90	1000	A1	2	3,41	3,41	0	2,5	2,5	19,5	0,94	—	18,3	4	C	1,40	5,6	OK
222	Ar-condicionado 3	0,90	3000	A1	2	10,23	10,23	0	2,5	2,5	19,5	0,94	—	18,3	16	C	1,42	22,7	OK
230	10×TUG 1	0,95	1000	B1	2	0	2,01	2,01	2,5	2,5	24	0,94	—	22,6	4	C	1,40	5,6	OK
231	10×TUG 2	0,95	1000	B1	2	2,01	2,01	0	2,5	2,5	24	0,94	—	22,6	4	C	1,40	5,6	OK
232	10×TUG 3	0,95	1000	B1	2	2,01	0	2,01	2,5	2,5	24	0,94	—	22,6	4	C	1,40	5,6	OK
240	13×Luminárias	1,00	390	C	2	2,21	0	0	1,5	1,5	19,5	0,94	—	18,3	4	B	1,35	5,4	OK
250	TUE 1	0,95	1200	B1	2	0	2,81	2,81	2,5	2,5	24	0,94	—	22,6	4	C	1,40	5,6	OK
251	TUE 2	0,95	1200	B1	2	2,81	2,81	0	2,5	2,5	24	0,94	—	22,6	4	C	1,40	5,6	OK
280	**QS-Bombas**	**0,81**	**2250**	**B1**	**2**	**3,41**	**0**	**5,71**	**2,5**	**2,5**	**24**	**0,94**	**0,80**	**18,0**	**6**	**C**	**1,42**	**8,5**	**OK**
281	Piscina	0,80	1500	B1	2	3,41	0	3,41	2,5	2,5	24	0,94	—	22,6	4	C	1,42	5,7	OK
282	Caixa d'água	0,82	750	B1	2	0	0	2,30	2,5	2,5	24	0,71	—	17,0	4	C	1,42	5,7	OK
300	**QS3 – Outras salas**	**0,95**	**4400**	**B1**	**3**	**3,22**	**10,31**	**6,83**	**2,5**	**4**	**28**	**0,94**	**0,70**	**18,4**	**16**	**C**	**1,40**	**22,4**	**OK**
310	10×TUG	0,95	1000	B1	2	0	2,01	2,01	2,5	2,5	24	0,94	—	22,6	4	C	1,40	5,6	OK
320	10×TUG	0,95	1000	B1	2	0	3,48	0	2,5	2,5	24	0,94	—	22,6	4	C	1,40	5,6	OK
330	TUE 1	0,95	600	B1	2	0	1,61	1,61	2,5	2,5	24	0,94	—	22,6	2	C	1,40	2,8	OK
331	TUE 2	0,95	600	B1	2	1,61	1,61	0	2,5	2,5	24	0,94	—	22,6	2	C	1,40	2,8	OK
332	TUE 3	0,95	600	B1	2	1,61	0	1,61	2,5	2,5	24	0,94	—	22,6	2	C	1,40	2,8	OK
333	TUE 4	0,95	600	B1	2	0	1,61	1,61	2,5	2,5	24	0,94	—	22,6	2	C	1,40	2,8	OK
400	**QS4 – Segundo andar**	**0,94**	**6360**	**B1**	**3**	**10,65**	**8,22**	**15,68**	**4**	**4**	**28**	**0,87**	**0,80**	**19,5**	**16**	**C**	**1,40**	**22,4**	**OK**
410	Ar-condicionado	0,90	2600	A1	2	8,86	0	8,86	2,5	2,5	19,5	0,87	—	17,0	10	C	1,42	14,2	OK
420	Boiler resistivo	1,00	3000	B1	2	0	6,82	6,82	2,5	2,5	24	0,87	—	20,9	10	B	1,45	14,5	OK
430	7×TUG	0,95	700	B1	2	1,41	1,41	0	2,5	2,5	24	0,87	—	20,9	2	C	1,40	2,8	OK
440	2×Luminárias	1,00	60	C	2	0,38	0	0	1,5	1,5	19,5	0,87	—	17,0	2	B	1,35	2,7	OK
500	**QS5 – Terceiro andar**	**0,95**	**2000**	**B1**	**2**	**4,78**	**4,78**	**0**	**2,5**	**2,5**	**24**	**0,71**	**0,80**	**13,6**	**6**	**C**	**1,36**	**8,2**	**OK**
600	**QS-Reserva 1**	**1,00**	**800**	**B1**	**3**	**1,05**	**1,05**	**1,05**	**2,5**	**2,5**	**21**	**0,94**	**0,80**	**15,8**	**2**	**C**	**1,35**	**2,7**	**OK**
700	**QS-Reserva 2**	**1,00**	**800**	**B1**	**3**	**1,05**	**1,05**	**1,05**	**2,5**	**2,5**	**21**	**0,94**	**0,80**	**15,8**	**2**	**C**	**1,35**	**2,7**	**OK**

Nota: As linhas destacadas em cinza indicam circuitos ou alimentadores nos quais a verificação final exigiu alteração em relação à seleção preliminar apresentada na Tabela 11.5. O destaque não indica erro conceitual da etapa anterior, mas evidencia que o dimensionamento preliminar deve ser confirmado pelas condições reais de instalação, pela capacidade de condução tabelada e pela coordenação com o dispositivo de proteção. Nesta tabela, $I_{Z,\mathrm{tab}}$ e I_Z foram calculados com a seção indicada em A_{final}. Para fins didáticos, adotou-se método A1 nos circuitos de ar-condicionado, método A2 nos circuitos de chuveiro elétrico e método C nos circuitos de iluminação.

Nota

Natureza iterativa da verificação: A verificação final pode levar o projetista a retornar a etapas anteriores. Uma seção preliminar pode atender à queda de tensão e à seção mínima normativa, mas falhar na coordenação com o disjuntor, na capacidade de interrupção ou na atuação em curto-circuito. Nesse caso, a solução pode ser aumentar a seção, escolher outro dispositivo, alterar a curva, reduzir agrupamentos ou modificar as condições de instalação.

12.2.6 Interpretação da tabela de verificação

A Tabela 12.1 deve ser lida como uma tabela de validação, e não como uma nova tabela de demanda. Por esse motivo, não são repetidas todas as colunas da Tabela 11.5. As potências, demandas e correntes já foram consolidadas nos capítulos anteriores; nesta etapa, o foco passa a ser a verificação da seção adotada e da proteção associada.

As colunas $\cos\phi$ e P foram mantidas para facilitar a identificação elétrica da carga analisada. As colunas $I_{B,\mathbf{S}}$, $I_{B,\mathbf{R}}$ e $I_{B,\mathbf{T}}$ apresentam as correntes por fase. Nos circuitos terminais, essas correntes indicam a fase ou as fases utilizadas pela carga; nos alimentadores, indicam a distribuição das correntes de demanda entre as fases. Para a verificação do condutor, considera-se a maior corrente de fase aplicável ao circuito ou alimentador.

A coluna MI indica o método de instalação ou método de referência adotado. No estudo de caso, foram usados os métodos A1, A2, B1 e C, conforme a condição didática assumida: A1 para circuitos de ar-condicionado, A2 para chuveiros elétricos, C para iluminação e B1 para os demais circuitos usuais em eletroduto e alimentadores. A coluna n_c indica o número de condutores carregados considerado na consulta da capacidade de condução tabelada.

A coluna A_{pre} representa a seção preliminar obtida no Capítulo 11. A coluna A_{final} representa a seção adotada após a verificação final. Quando as duas seções coincidem, a seleção preliminar foi confirmada. Quando A_{final} é maior que A_{pre}, a verificação indicou a necessidade de aumentar a seção para atender aos critérios de instalação, capacidade de condução e proteção.

A coluna $I_{Z,\text{tab}}$ apresenta a capacidade de condução de corrente extraída da tabela normativa para a seção final adotada, considerando o método de instalação, o tipo de isolação e o número de condutores carregados. As colunas f_t e f_g indicam, respectivamente, os fatores de correção por temperatura e por agrupamento. Quando determinado fator não é aplicável, considera-se valor igual a $1{,}00$. A capacidade corrigida I_Z é obtida pelo produto direto entre $I_{Z,\text{tab}}$ e os fatores aplicáveis.

A coluna α_2 simula a variação do coeficiente de atuação convencional entre dispositivos comerciais. A coluna I_2 é calculada por $I_2 = \alpha_2 \cdot I_n$. A verificação final exige que a corrente convencional de atuação não ultrapasse $1{,}45 \cdot I_Z$, conforme apresentado no Capítulo 11.

As colunas I_n e *CD* indicam, respectivamente, a corrente nominal e a curva de disparo do dispositivo de proteção. A curva deve ser compatível com a corrente de partida ou energização da carga e com a corrente mínima de curto-circuito presumida no ponto de instalação. A coluna "**Verif.**" sintetiza o resultado da verificação proteção-condutor para a seção final adotada.

! Importante

Leitura das linhas destacadas: Quando uma linha da tabela aparece destacada, isso indica que a verificação final exigiu alteração em relação à seleção preliminar. O destaque não representa erro conceitual da etapa anterior, mas demonstra que o dimensionamento preliminar precisa ser confirmado pelas condições reais de instalação, pela capacidade de condução tabelada e pela coordenação com o dispositivo de proteção.

No estudo de caso, alguns circuitos e alimentadores exigiram aumento de seção quando o método de instalação, o número de condutores carregados e os fatores de correção foram aplicados com maior detalhe. Essa situação é didaticamente importante, pois mostra que uma seção aparentemente suficiente em uma estimativa preliminar pode deixar de ser adequada na verificação final.

12.2.7 Procedimento resumido de decisão

A seleção final deve ser tratada como uma decisão conjunta entre condutor, método de instalação e proteção. Quando todas as condições são atendidas, a seção preliminar pode ser confirmada. Quando alguma condição falha, devem ser avaliadas alternativas de correção.

Em termos práticos, as alternativas mais comuns são:

- Aumentar a seção do condutor, elevando a capacidade de condução corrigida I_Z;
- Reduzir I_n do dispositivo de proteção, quando isso não provocar atuação indevida em operação normal;
- Alterar o método de instalação, quando possível, para melhorar a dissipação térmica;
- Reduzir o agrupamento de circuitos no mesmo percurso;
- Escolher dispositivo de proteção com curva de disparo mais adequada à carga;
- Verificar dispositivo de proteção com característica térmica mais compatível, conforme catálogo do fabricante;
- Selecionar dispositivo com maior capacidade de interrupção, quando I_{cc} presumida assim exigir;
- Rever a distribuição de cargas entre quadros e circuitos.

Aviso

Correção inadequada: Não se deve resolver uma falha de coordenação apenas aumentando a corrente nominal do disjuntor. Essa prática pode eliminar desligamentos indevidos, mas também pode deixar o condutor sem proteção adequada contra sobrecarga. A correção deve preservar simultaneamente as condições de operação normal, proteção contra sobrecarga, atuação em curto-circuito e capacidade de interrupção.

A verificação final também deve considerar a documentação do dispositivo escolhido. Em especial, devem ser confirmados a corrente nominal, a curva de disparo, a capacidade de interrupção, a diferença de potencial elétrico de operação, o número de polos, a temperatura de referência, a forma de montagem, a energia passante, a seletividade e as restrições indicadas pelo fabricante.

12.3 Resumo do capítulo

Neste capítulo, foi apresentada a verificação final de condutores e dispositivos de proteção em instalações elétricas de baixa tensão. A partir dos resultados preliminares obtidos no Capítulo 11, foram analisadas as condições que confirmam ou corrigem a seleção inicial das seções dos condutores e dos disjuntores.

Foi mostrado que o método de instalação deve ser identificado antes da consulta das tabelas de capacidade de condução. No estudo de caso, foram considerados métodos de instalação ou de referência distintos conforme o tipo de circuito analisado. Em seguida, a capacidade de condução tabelada $I_{Z,\text{tab}}$ foi relacionada ao material do condutor, ao tipo de isolação, ao método adotado, ao número de condutores carregados e à seção final escolhida.

Também foi discutido que a capacidade corrigida I_Z deve ser obtida pela aplicação direta dos fatores de correção necessários, como temperatura ambiente e agrupamento. Esses fatores não substituem a consulta correta da tabela normativa, mas ajustam o valor tabelado às condições reais ou assumidas de instalação.

Em seguida, foi aprofundada a verificação da capacidade de interrupção frente à corrente de curto-circuito presumida. Destacou-se que a corrente nominal do disjuntor não informa, por si só, sua capacidade de interromper uma falta severa, sendo necessário distinguir a corrente máxima de curto-circuito, usada na verificação da capacidade de interrupção, da corrente mínima de curto-circuito, usada na verificação da atuação adequada do dispositivo.

Por fim, a escolha da curva de disparo foi tratada como critério de aplicação, considerando a corrente de partida, a corrente nominal do dispositivo e a corrente mínima de curto-circuito. A tabela de verificação final mostrou que alguns circuitos ou alimentadores podem exigir aumento de seção após a aplicação mais detalhada do método de instalação, dos fatores de correção e da coordenação proteção-condutor.

Capítulo 13

Diagrama unifilar

13.1 Introdução

Nos capítulos anteriores, foram desenvolvidas as etapas de levantamento de cargas, organização do quadro de cargas, cálculo de demanda, dimensionamento preliminar de condutores e verificação final dos condutores e dispositivos de proteção. Esses resultados fornecem os dados técnicos necessários para representar a instalação elétrica de forma organizada. A partir deste capítulo, o foco passa da memória de cálculo para a documentação gráfica do projeto.

O diagrama unifilar é uma representação importante na instalação elétrica. Ele apresenta, por meio de uma única linha principal, a estrutura dos quadros, dos alimentadores, dos circuitos terminais, dos dispositivos de proteção, dos condutores e das principais informações elétricas associadas ao sistema. Por isso, funciona como uma ponte entre o quadro de cargas, o memorial de cálculo e a execução física da instalação.

Diferentemente de uma planta baixa, o diagrama unifilar não tem como objetivo mostrar o percurso geométrico exato dos eletrodutos ou a posição real de cada equipamento no ambiente. Seu objetivo é mostrar a hierarquia elétrica da instalação: de onde vem a alimentação, por quais dispositivos ela passa, quais quadros são alimentados, quais circuitos saem desses quadros e quais cargas são atendidas.

Definição

Diagrama unifilar: O diagrama unifilar é uma representação simplificada de um sistema elétrico, na qual condutores, fases, neutro e proteção são mostrados por uma única linha gráfica, acompanhada de anotações que identificam número de condutores, seção, proteção, tensão, corrente nominal e destino do circuito.

O objetivo deste capítulo é apresentar a função do diagrama unifilar, seus principais elementos e um procedimento de construção manual a partir do quadro de cargas e do memorial de cálculo. Para isso, são discutidas inicialmente as informações mínimas de leitura, a relação entre quadro de cargas e diagrama, e a importância da coerência documental entre tabelas, desenhos e dispositivos de proteção.

Na sequência, o capítulo apresenta dois exemplos complementares: primeiro, o diagrama unifilar associado ao estudo de caso residencial desenvolvido nos capítulos anteriores; depois, um projeto-base industrial, com QGBT, quadros secundários funcionais, motores trifásicos, banco de capacitores, grupo eletrógeno, circuitos auxiliares, DPS, DDRs e reservas técnicas. Esse percurso permite comparar a representação de instalações residenciais e industriais, destacando como a complexidade do diagrama aumenta conforme surgem motores, manobras, fontes alternativas e dispositivos complementares de proteção e comando.

13.2 Desenvolvimento teórico

13.2.1 Conceito e função do diagrama unifilar

O diagrama unifilar pode ser entendido como um mapa elétrico hierárquico. Ele não mostra todos os condutores separados, como ocorre em um diagrama trifilar ou multifilar, mas indica de forma compacta como a energia elétrica é distribuída dentro da instalação. A linha única representa o caminho elétrico principal, enquanto as anotações indicam quantos condutores existem, quais são as fases utilizadas, qual é a seção dos cabos e qual dispositivo de proteção está associado ao circuito.

Em instalações industriais, essa representação é especialmente útil porque permite visualizar rapidamente a alimentação de quadros, motores, tomadas industriais, circuitos de iluminação, sistemas de comando e cargas auxiliares. O diagrama também facilita a revisão técnica do projeto, a conferência das proteções, a identificação de reservas e a comunicação entre projetistas, instaladores, técnicos de manutenção e responsáveis pela operação.

Nota

Representação simplificada: A palavra "unifilar" não significa que o circuito possua apenas um condutor. Ela indica que vários condutores são representados graficamente por uma única linha, acompanhada de notações técnicas.

A Figura 13.1 apresenta uma representação conceitual da diferença entre o sistema real e sua representação unifilar.

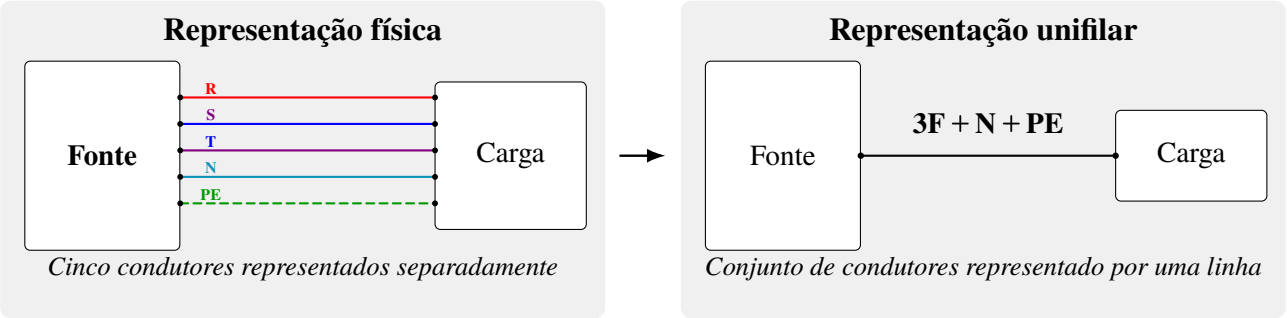

Figura 13.1: Conceito de simplificação gráfica no diagrama unifilar: vários condutores reais podem ser representados por uma única linha, desde que a anotação técnica indique sua composição.

O diagrama unifilar deve ser lido em conjunto com o quadro de cargas e o memorial de cálculo. Conforme o Capítulo 9, o quadro organiza potências, demandas, correntes e circuitos. O cálculo de demanda, discutido no Capítulo 10, fornece correntes de projeto mais realistas. O dimensionamento e a verificação, nos Capítulos 11 e 12, definem seções dos condutores e características dos dispositivos de proteção.

Nota

Memorial de cálculo No contexto de uma instalação elétrica, o memorial de cálculo é o documento técnico que registra os critérios, hipóteses, dados de entrada e resultados usados no dimensionamento da instalação. Nele são apresentados, por exemplo, o levantamento de cargas, as potências consideradas, os fatores de demanda ou simultaneidade, as correntes de projeto, a escolha preliminar dos condutores, a verificação da capacidade de condução, a queda de diferença de potencial elétrico e a seleção dos dispositivos de proteção.
O memorial de cálculo não substitui os desenhos do projeto, mas explica e justifica tecnicamente as escolhas representadas neles. Assim, o quadro de cargas, o diagrama unifilar, o diagrama trifilar e a lista de materiais devem ser coerentes com os resultados registrados no memorial. Em uma instalação elétrica bem documentada, o desenho mostra a solução adotada, enquanto o memorial demonstra como essa solução foi calculada e verificada.

13.2.2 Informações mínimas do diagrama

Um diagrama unifilar não deve ser apenas um desenho de linhas e símbolos. Ele deve conter informações suficientes para que a instalação representada seja compreendida tecnicamente sem apresentar ambiguidades. Em projetos de baixa tensão, é comum que cada circuito ou alimentador apresente, no mínimo, identificação segundo a nomenclatura do projeto, tipo de alimentação, dispositivo de proteção, condutores e destino.

A lista a seguir reúne informações consideradas essenciais para a leitura de um diagrama unifilar:

- **Identificação do circuito:** Relaciona o circuito ao quadro de cargas e ao memorial de cálculo. Não existe uma nomenclatura obrigatória, mas é importante que a identificação seja única, clara e consistente entre os documentos do projeto. Alguns exemplos de nomenclatura sistemática são:
  - **Por quadro e sequência do circuito:** Utiliza o código do quadro seguido do número do circuito. Exemplo: “QGBT-C01”, “QS1-C03”, “QM1-C05”. Essa forma é simples e facilita localizar a origem do circuito.
  - **Por ambiente, setor ou função:** Combina o local atendido com o tipo de carga. Exemplo: “COZ-TUG-01”, “DOR-ILU-02”, “OFI-MOT-01”. Essa forma é útil quando o projeto possui muitos ambientes ou setores produtivos. Dependendo do contexto da instalação, alguns códigos podem ser mais intuitivos do que outros, neste sentido, é recomendável ter uma legenda de códigos para facilitar a leitura.
  - **Por tipo de sistema,ou equipamento:** Identifica diretamente a natureza do circuito ou do equipamento alimentado. Exemplo: “MOT-M1”, “BOM-B1”, “AC-02”, “ILU-GALP-01”. Essa forma é comum em instalações industriais, nas quais cargas e painéis auxiliares precisam ser rapidamente reconhecidos.
- **Tipo de alimentação:** Indica se o circuito é monofásico, bifásico ou trifásico. Exemplos:
  - *Circuito monofásico, fase-neutro:* **1F + N + PE**;
  - *Circuito bifásico com neutro:* **2F + N + PE**;
  - *Circuito bifásico sem neutro:* **2F + PE**;
  - *Circuito trifásico com neutro:* **3F + N + PE**;
  - *Circuito trifásico sem neutro:* **3F + PE**.
- **Dispositivo de proteção:** Informa corrente nominal, número de polos, curva de disparo e, quando necessário, capacidade de interrupção. Exemplo: DJ **3F** $32\,[\mathrm{A}]$, curva C, $I_{\mathrm{int}} = 10\,[\mathrm{kA}]$.
- **Condutores:** Indica quantidade, seção e função dos condutores do circuito. Exemplos:
  - **3F + PE** com condutores de mesma seção $6\,[\mathrm{mm}^2]$, ou simplesmente: **3F + PE** $6\,[\mathrm{mm}^2]$;
  - **3F** $40\,[\mathrm{mm}^2]$ + **PE** $20\,[\mathrm{mm}^2]$, de acordo com a normativa apresentada na Seção 11.2.7;
  - **3F + N + PE** com condutores de mesma seção $10\,[\mathrm{mm}^2]$, ou simplesmente: **3F + N + PE** $10\,[\mathrm{mm}^2]$;
  - **2F** $4\,[\mathrm{mm}^2]$ + **PE** $4\,[\mathrm{mm}^2]$, ou simplesmente: **2F + PE** $4\,[\mathrm{mm}^2]$;
  - **F** $2{,}5\,[\mathrm{mm}^2]$ + **N** $2{,}5\,[\mathrm{mm}^2]$ + **PE** $2{,}5\,[\mathrm{mm}^2]$, ou simplesmente: **1F + N + PE** $2{,}5\,[\mathrm{mm}^2]$.
- **Diferença de potencial elétrico:** Registra a alimentação da carga. Exemplo: $220/127\,[\mathrm{V}]$, $380/220\,[\mathrm{V}]$.

Essas informações podem ser apresentadas junto aos símbolos ou em uma legenda auxiliar. Em diagramas maiores, deve-se evitar excesso de texto próximo às linhas, pois isso reduz a legibilidade. Nesse caso, recomenda-se manter no desenho as informações essenciais e complementar os detalhes em tabelas, quadros de cargas ou listas de circuitos. O diagrama unifilar dever ser simples, funcional e fácil de ler, não um documento técnico completo.

Aviso

Diagrama sobrecarregado: Um erro frequente é tentar incluir no diagrama unifilar todas as informações presentes no memorial de cálculo ou no quadro de cargas, o que pode resultar em um desenho visualmente confuso. O diagrama deve conter apenas os dados necessários para a leitura elétrica do sistema, enquanto cálculos detalhados, justificativas e verificações permanecem no memorial ou nas tabelas técnicas. Embora não seja uma exigência normativa, essa prática segue recomendações consolidadas em projetos elétricos.

13.2.3 Símbolos e elementos principais

A simbologia utilizada em diagramas unifilares deve ser consistente, legível e compatível com a documentação técnica adotada no projeto. Em uma instalação real, os símbolos podem seguir bibliotecas normativas, bibliotecas internas da empresa, modelos de fabricantes ou padrões adotados pelo software de desenho elétrico. O mais importante, do ponto de vista didático, é que cada símbolo seja identificado de forma inequívoca.

Entre os elementos mais comuns de um diagrama unifilar de baixa tensão, podem ser destacados:

- **Fonte de alimentação:** Representa a origem da energia elétrica da instalação ou de uma parte dela. Essa fonte pode ser a rede da concessionária, um transformador, um grupo gerador, um sistema de energia auxiliar ou o barramento principal de um quadro já existente. No diagrama unifilar, a fonte indica de onde parte a alimentação e qual é a diferença de potencial elétrico disponível para os circuitos a jusante.
- **Quadro geral:** Concentra a proteção principal da instalação e funciona como ponto inicial de distribuição interna. A partir dele, podem sair alimentadores para quadros secundários, circuitos terminais de maior potência ou reservas técnicas. Em muitos projetos, o quadro geral também reúne barramentos, dispositivos de proteção contra surtos, seccionamento geral e identificação da entrada de energia.
- **Quadros secundários:** Organizam grupos de circuitos por setor, função, pavimento, ambiente ou tipo de carga. Um quadro secundário pode atender, por exemplo, motores, iluminação, tomadas, climatização ou serviços auxiliares. Essa divisão facilita a manutenção, reduz a concentração de circuitos em um único ponto.
- **Disjuntores:** Realizam a proteção contra sobrecorrentes, interrompendo o circuito em situações de sobrecarga ou curto-circuito (Capítulos 6 e 12). No diagrama unifilar, devem ser indicados com informações mínimas como número de polos, corrente nominal, curva de disparo e, quando necessário, capacidade de interrupção.
- **DPS:** Dispositivo de proteção contra surtos, usado quando previsto no projeto para reduzir os efeitos de sobretensões transitórias. Essas sobretensões podem ser associadas a descargas atmosféricas indiretas, manobras na rede ou perturbações internas. No diagrama unifilar, o DPS costuma aparecer conectado ao barramento ou à entrada do quadro, com ligação ao sistema de proteção.
- **DR ou IDR:** Dispositivo diferencial residual, utilizado para detectar correntes diferenciais residuais e desligar o circuito quando essas correntes ultrapassam o valor de atuação previsto. Sua aplicação está associada à proteção contra choques elétricos e a requisitos específicos de segurança. No diagrama, deve ficar claro quais circuitos ou grupos de circuitos estão protegidos por esse dispositivo.
- **Contatores e relés:** São elementos de manobra, comando e proteção complementar, muito comuns em circuitos de motores. O contator permite ligar e desligar cargas por comando elétrico, enquanto relés térmicos, relés eletrônicos ou outros dispositivos podem atuar na proteção contra sobrecarga, falta de fase ou condições anormais de operação. Em diagramas unifilares, esses elementos aparecem principalmente nos ramais de força.
- **Barramentos:** São pontos de distribuição elétrica dentro dos quadros, usados para organizar fases, neutro e condutor de proteção. Em um diagrama unifilar, o barramento ajuda a visualizar a origem dos circuitos e a separação entre condutores ativos (**F**), neutro (**N**) e equipotencialização (**PE**). A representação adequada dos barramentos melhora a leitura da alimentação, das derivações e dos vínculos com o sistema de aterramento.
- **Cargas:** São os equipamentos ou conjuntos alimentados pelos circuitos, como motores, luminárias, tomadas, resistências, bombas, condicionadores de ar e sistemas auxiliares. A identificação da carga deve permitir relacionar o símbolo ou ramal do diagrama ao quadro de cargas e ao memorial de cálculo. Em instalações industriais, recomenda-se nomear cargas relevantes com códigos consistentes (e.g.: M1, B1, AC1 ou QF-01).
- **Condutores:** São os elementos metálicos responsáveis por conduzir a corrente elétrica entre a fonte e as cargas.

Nota

Símbolo e especificação: O símbolo gráfico indica a função do componente no circuito. A especificação técnica, por sua vez, deve informar características como corrente nominal, número de polos, curva de disparo, capacidade de interrupção, categoria de utilização ou sensibilidade diferencial, quando aplicável.

Neste livro, a simbologia elétrica não é apresentada objetivando normalização. Como já discutido na Seção 7.2.3, a representação gráfica de componentes elétricos possui histórico próprio e depende de normas técnicas, práticas de mercado, bibliotecas de software, manuais de fabricantes e convenções internas de cada projetista ou empresa. Por esse motivo, recomenda-se consultar fontes específicas de simbologia e documentação técnica, como **ABNT NBR 5444** (ABNT NBR 5444, 1989), **ABNT NBR 5445** (ABNT NBR 5445, 1988), **ABNT NBR 5446** (ABNT NBR 5446, 1989), **IEC 60617** (IEC 60617, 2026), **IEC 61082-1** (IEC 61082-1, 2014), **ISO 14617-1** (ISO 14617-1, 2025), **IEEE 315** (IEEE 315, 1975) e **IEC 81346-1** (IEC 81346-1, 2022), além de livros e manuais técnicos como **Botelho e Figueiredo** (Botelho e Figueiredo, 2012), **Schneider Electric** (Schneider Electric, 2026), **ABB** (ABB, 2010), **WEG** (WEG, 2024) e **QElectroTech** (QElectroTech Team, 2024).

Este livro ensina a leitura e a construção básica do diagrama unifilar, sem propor novas simbologias ou substituir normas vigentes. Na prática profissional, a escolha dos símbolos deve ser documentada em legenda e apresentar estrita coerência entre planta, quadro de cargas, diagrama e memorial descritivo, respeitando sempre as normas técnicas específicas de cada instalação.

Aviso

Diversidade de diagramas unifilares: É fundamental que o estudante de eletrotécnica ou engenharia compreenda que o diagrama unifilar não possui uma representação visual estática ou universal. Embora fundamentado em normas técnicas, a aparência final do projeto é moldada pela finalidade da instalação, seja ela residencial, comercial ou industrial. Em contextos prediais, o diagrama frequentemente se funde à geometria da planta baixa para orientar a passagem física dos condutos, enquanto em sistemas de potência, ele assume uma forma puramente lógica e esquemática, priorizando a topologia da rede e a coordenação de proteções em detrimento da disposição espacial.
O estudante deve estar preparado para variações de estilo e detalhamento entre profissionais, desde esquemas simplificados a documentos densos de potência. Dominar essa ferramenta exige capacidade interpretativa para extrair a lógica do sistema, indo muito além da mera memorização de símbolos.

13.2.4 Relação com o quadro de cargas

A construção do diagrama unifilar deve começar a partir do quadro de cargas; todo diagrama unifilar deve estar associado com um quadro de cargas, todo quadro de cargas deve pelo menos ter um diagrama unifilar associado.

A relação entre quadro de cargas e diagrama unifilar pode ser resumida da seguinte forma:

- A **identificação do circuito** no quadro de cargas deve ser preservada no diagrama;
- A **corrente de projeto** orienta a escolha do dispositivo de proteção e da seção do condutor;
- A **distribuição de fases** indica se o circuito será representado como monofásico, bifásico ou trifásico;
- A **seção final do condutor** deve ser informada no alimentador ou circuito terminal correspondente;
- O **dispositivo de proteção** deve aparecer antes da carga protegida;
- Os **quadros subordinados** devem ser representados como cargas aninhadas.

Importante

Coerência documental: A numeração dos circuitos, a corrente nominal dos disjuntores, as seções dos condutores e os nomes dos quadros devem ser os mesmos no quadro de cargas, no memorial de cálculo e no diagrama unifilar. Divergências entre documentos dificultam a execução e aumentam o risco de erro de instalação.

A Figura 13.2 apresenta o diagrama unifilar correspondente ao exemplo didático desenvolvido nas Tabelas 11.5 e 12.1. A representação utiliza a nomenclatura adotada no quadro de cargas, preservando a identificação dos circuitos e quadros, como QGBT, QS1, QS2, QS-Bombas, QS3, QS4, QS5 e reservas técnicas.

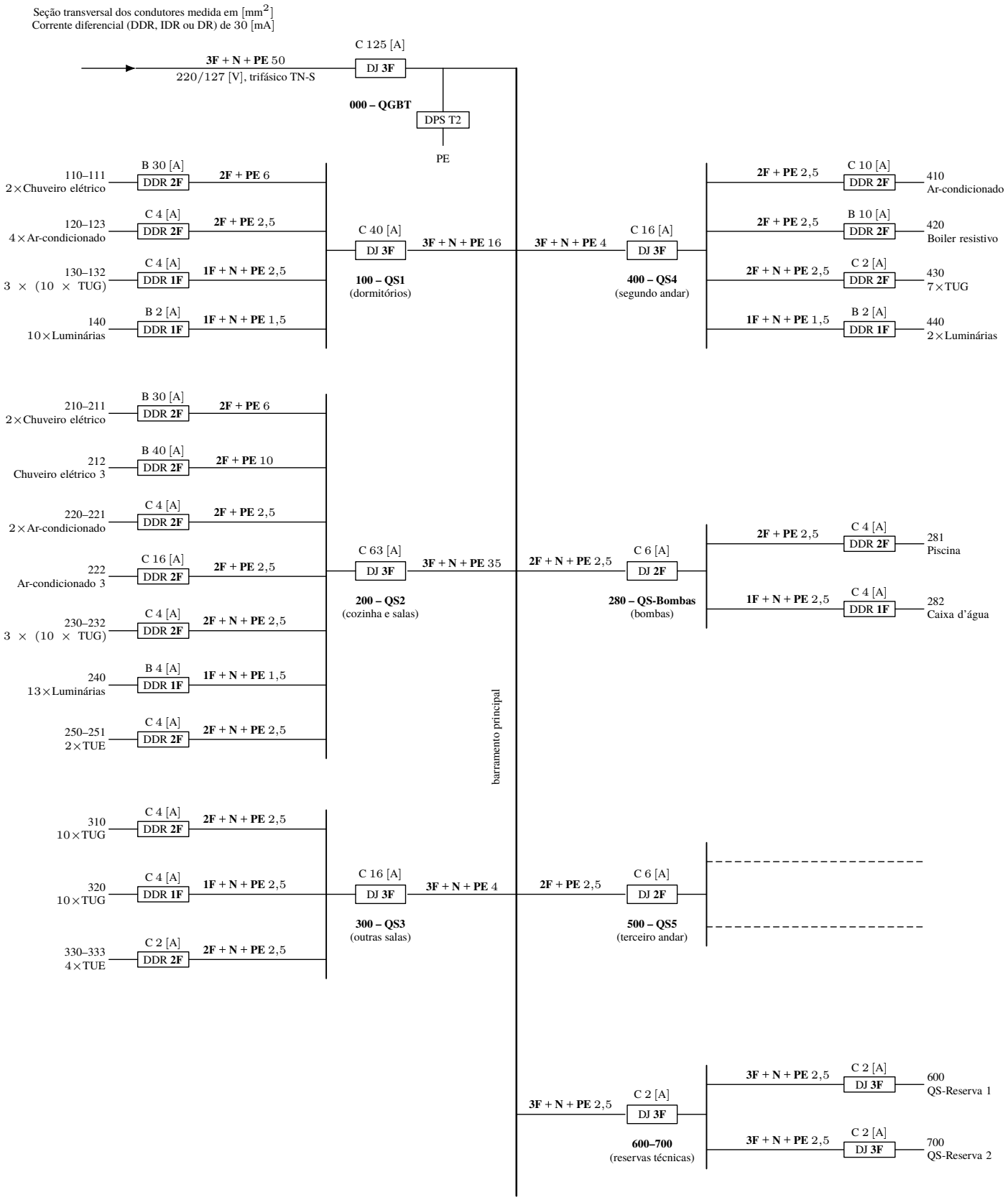

Figura 13.2: Diagrama unifilar associado ao quadro de cargas apresentado nas Tabelas 11.5 e 12.1. A representação mostra a hierarquia elétrica da instalação, com quadros, alimentadores, circuitos terminais, dispositivos de proteção (DJ, DDR e DPS), e informações técnicas simplificadas.

A Figura 13.2 apresenta, de forma gráfica e hierárquica, a estrutura do sistema elétrico residencial, evidenciando a relação de aninhamento entre o quadro geral (QGBT), os alimentadores, os quadros secundários (QS) e os circuitos terminais. O diagrama atua como um filtro dos dados tabulares mais relevantes do projeto, indicando de maneira resumida o tipo de alimentação, as seções nominais dos condutores e as características dos dispositivos de proteção, tais como a corrente nominal e a curva de disparo dos disjuntores. Essa disposição visual permite compreender rapidamente o fluxo de energia e a subdivisão das cargas na instalação.

Na representação dos circuitos terminais de iluminação (luminárias) e ar-condicionado, optou-se didaticamente pela aplicação de dispositivos DDR, uniformizando a leitura gráfica da proteção diferencial residual nos circuitos finais e diferenciando-os dos alimentadores, que utilizam apenas disjuntores termomagnéticos. Recomenda-se o uso do DDR com as características explicitadas; contudo, se houver limitações práticas para a aquisição desse bloco único, é perfeitamente possível substituí-lo por um disjuntor termomagnético associado a um interruptor diferencial residual (IDR ou DR) como dispositivos separados. No caso do ar-condicionado, essa abordagem integrada deve ser entendida como uma simplificação, visto que projetos executivos exigem a verificação das correntes de fuga e da seletividade dos equipamentos. Já para a iluminação, o uso do dispositivo diferencial torna-se opcional ou obrigatório a depender das características da instalação, como na presença de luminárias em ambientes úmidos.

Por fim, as linhas segmentadas no diagrama unifilar, no alimentador QS5, indicam circuitos ainda não projetados ou temporários, ou seja, pontos nos quais se prevê a possibilidade física de futura conexão, mas sem carga, potência instalada ou dispositivo terminal definitivamente especificados (e.g.: Parte da residência ainda em construção ou em processo de ampliação). Essa representação difere substancialmente dos circuitos de reserva, pois estes já possuem um limite de projeto estabelecido, com potência máxima prevista, condutores dimensionados e dispositivo de proteção indicado, ainda que a carga final venha a ser conectada apenas posteriormente.

13.2.5 Projeto-base de quadro de cargas industrial

Para este capítulo, adota-se um exemplo didático de natureza industrial, independente do estudo de caso residencial tratado nos Capítulos 9 a 12. Embora o raciocínio matemático seja o mesmo, alterando-se apenas as cargas e os fatores de demanda e correção, o objetivo não é replicar todos os dimensionamentos, mas fornecer uma base coerente para a construção do diagrama unifilar industrial.

Considere uma pequena instalação industrial alimentada em baixa tensão, com sistema trifásico (λ) $380/220\,[\mathrm{V}]$, $60\,[\mathrm{Hz}]$, em esquema TN-S. A instalação é composta por um quadro geral de baixa tensão industrial, quadros secundários funcionais, circuitos terminais de força, iluminação, tomadas, comando, climatização, um banco de capacitores e cargas auxiliares associadas ao grupo eletrógeno. As cargas foram agrupadas por função.

O quadro geral foi identificado como QGBT-IND. O quadro QM-FLU reúne os motores destinados ao transporte de fluidos e à exaustão, incluindo duas bombas de leite, duas bombas de óleo vegetal e um exaustor de pó. Para as bombas de leite, adotou-se potência de $6\,[\mathrm{cv}]$ por unidade, rendimento $\eta = 0{,}60$ e fator de potência estimado compatível com motores de indução de pequeno porte. Para as bombas de óleo vegetal, adotou-se potência de $10\,[\mathrm{cv}]$ por unidade, rendimento $\eta = 0{,}80$ e fator de potência também estimado. Essas hipóteses permitem representar, de forma didática, cargas motoras com diferentes rendimentos, potências e condições de operação, simulando o cenário típico de uma indústria alimentícia ou de processamento de laticínios.

Além dos motores principais, foram considerados quadros para iluminação, tomadas de manutenção, comando e automação, climatização e ventilação auxiliar, reserva técnica, banco de capacitores e auxiliares do grupo eletrógeno. O banco de capacitores foi representado como QBC-01, isto é, como um quadro próprio da instalação. Foi adotado o critério de correção global do fator de potência para aproximadamente $\cos\phi = 0{,}95$.

A Tabela 13.1 sintetiza os parâmetros elétricos e os resultados dos dimensionamentos deste novo exemplo didático. Nela constam as informações essenciais de cada circuito, como correntes trifásicas de projeto, seções finais dos condutores e especificações dos dispositivos de proteção termo-magnética, que servirão de base direta para a estruturação e o desenho do diagrama unifilar industrial.

Tabela 13.1: Tabela didática para sistema industrial **3F + N + PE**, $380/220\,[\mathrm{V}]$, $60\,[\mathrm{Hz}]$, em esquema TN-S.

k	Carga	cos ϕ	Δl [m]	MI	n_c	f_u	$f_{s\|c}$	S [kVA]	$I_{B,R}$ [A]	$I_{B,S}$ [A]	$I_{B,T}$ [A]	f_t	f_g	I_Z [A]	I_n [A]	CD	α_2	I_2 [A]	δ_V [%]	A [mm^2]
000	**QGBT-IND**	**0,95**	**25 ± 5**	**B1**	**3**	**—**	**—**	**64,5**	**98,6**	**102,0**	**95,0**	**0,94**	**—**	**141,9**	**125**	**C**	**1,42**	**177,5**	**0,82**	**50**
100	**QM-FLU – Fluidos**	**0,83**	**35 ± 5**	**B2**	**3**	**—**	**—**	**45,8**	**69,7**	**69,7**	**69,7**	**0,94**	**0,80**	**94,0**	**80**	**D**	**1,42**	**113,6**	**1,18**	**35**
110	BL-01	0,82	42 ± 5	B1	3	1,00	0,90	9,0	13,6	13,6	13,6	0,94	—	30,1	20	D	1,42	28,4	1,36	4
111	BL-02	0,82	45 ± 5	B1	3	1,00	0,90	9,0	13,6	13,6	13,6	0,94	—	30,1	20	D	1,42	28,4	1,46	4
120	BO-01	0,84	44 ± 5	C	3	1,00	0,85	10,9	16,6	16,6	16,6	0,94	—	38,5	25	D	1,42	35,5	1,12	6
121	BO-02	0,84	48 ± 5	C	3	1,00	0,85	10,9	16,6	16,6	16,6	0,94	—	38,5	25	D	1,42	35,5	1,23	6
130	EX-PÓ	0,83	50 ± 5	B1	3	1,00	0,80	6,0	9,2	9,2	9,2	0,94	—	22,6	16	D	1,42	22,7	1,81	2,5
200	**QIL-01 – Iluminação.**	**0,95**	**32 ± 5**	**C**	**3**	**—**	**—**	**3,0**	**4,6**	**4,6**	**4,6**	**0,94**	**0,80**	**18,0**	**10**	**B**	**1,35**	**13,5**	**0,64**	**2,5**
210	IL-R	0,95	42 ± 5	C	2	0,90	0,90	1,0	4,5	0	0	0,94	—	16,4	6	B	1,35	8,1	0,58	1,5
211	IL-S	0,95	45 ± 5	C	2	0,90	0,90	1,0	0	4,5	0	0,94	—	16,4	6	B	1,35	8,1	0,62	1,5
212	IL-T	0,95	48 ± 5	C	2	0,90	0,90	1,0	0	0	4,5	0,94	—	16,4	6	B	1,35	8,1	0,66	1,5
300	**QTM-01 – Tomadas**	**0,95**	**34 ± 5**	**B1**	**3**	**—**	**—**	**6,0**	**9,1**	**9,1**	**9,1**	**0,94**	**0,80**	**24,1**	**20**	**C**	**1,40**	**28,0**	**0,92**	**4**
310	TM-R	0,95	42 ± 5	B1	2	0,70	0,60	2,0	9,1	0	0	0,94	—	22,6	16	C	1,40	22,4	1,08	2,5
311	TM-S	0,95	45 ± 5	B1	2	0,70	0,60	2,0	0	9,1	0	0,94	—	22,6	16	C	1,40	22,4	1,16	2,5
312	TM-T	0,95	48 ± 5	B1	2	0,70	0,60	2,0	0	0	9,1	0,94	—	22,6	16	C	1,40	22,4	1,24	2,5
400	**QCA-01 – Comando**	**0,90**	**36 ± 5**	**A1**	**3**	**—**	**—**	**1,5**	**2,3**	**2,3**	**2,3**	**0,94**	**0,80**	**13,2**	**6**	**C**	**1,40**	**8,4**	**0,45**	**1,5**
410	CA-PLC	0,90	41 ± 5	A1	2	1,00	1,00	0,5	2,3	0	0	0,94	—	16,4	4	C	1,40	5,6	0,28	1,5
411	CA-SEN	0,90	43 ± 5	A1	2	1,00	1,00	0,5	0	2,3	0	0,94	—	16,4	4	C	1,40	5,6	0,30	1,5
412	CA-RED	0,90	45 ± 5	A1	2	1,00	1,00	0,5	0	0	2,3	0,94	—	16,4	4	C	1,40	5,6	0,31	1,5
500	**QCL-01 – Climatização**	**0,90**	**38 ± 5**	**A2**	**3**	**—**	**—**	**6,2**	**11,8**	**11,8**	**4,5**	**0,94**	**0,80**	**24,1**	**20**	**C**	**1,40**	**28,0**	**1,05**	**4**
510	AC-01	0,90	42 ± 5	A2	2	0,85	0,90	2,6	11,8	0	0	0,94	—	22,6	16	C	1,42	22,7	0,91	2,5
511	AC-02	0,90	46 ± 5	A2	2	0,85	0,90	2,6	0	11,8	0	0,94	—	22,6	16	C	1,42	22,7	1,00	2,5
520	VA-01	0,85	49 ± 5	B1	2	1,00	0,80	1,0	0	0	4,5	0,94	—	16,4	6	C	1,40	8,4	0,88	1,5
600	**QBC-01 – Capacitores**	$0{,}00_{\mathrm{C}}$	**30 ± 5**	**B2**	**3**	**—**	**—**	**12,5**	**19,0**	**19,0**	**19,0**	**0,94**	**0,80**	**30,8**	**25**	**C**	**1,42**	**35,5**	**0,76**	**6**
610	BC-12	$0{,}00_{\mathrm{C}}$	40 ± 5	B2	3	1,00	1,00	12,5	19,0	19,0	19,0	0,94	—	38,5	25	C	1,42	35,5	1,01	6
700	**QGE-AUX – Standby**	**0,96**	**40 ± 5**	**B1**	**3**	**—**	**—**	**2,9**	**3,2**	**7,7**	**2,3**	**0,94**	**0,80**	**18,0**	**10**	**C**	**1,40**	**14,0**	**0,68**	**2,5**
710	CAR-GE	0,90	42 ± 5	A1	2	1,00	1,00	0,5	2,3	0	0	0,94	—	16,4	6	C	1,40	8,4	0,29	1,5
720	RES-GE	1,00	45 ± 5	B1	2	1,00	1,00	1,5	0	6,8	0	0,94	—	22,6	10	B	1,45	14,5	0,74	2,5
730	QTA-GE	0,90	46 ± 5	A1	2	1,00	1,00	0,3	0	0	1,4	0,94	—	16,4	2	C	1,40	2,8	0,20	1,5
740	BCB-GE	0,80	48 ± 5	B1	3	1,00	1,00	0,6	0,9	0,9	0,9	0,94	—	16,4	2	D	1,42	2,8	0,17	1,5
800	**QRES-01 – Reserva**	**1,00**	**45 ± 5**	**B1**	**3**	**1,00**	**0,50**	**5,0**	**7,6**	**7,6**	**7,6**	**0,94**	**0,80**	**18,0**	**16**	**C**	**1,40**	**22,4**	**1,12**	**2,5**

Nota: As linhas destacadas em cinza identificam quadros ou alimentadores principais, e não indicam alteração obrigatória de dimensionamento como feito Tabela 12.1. No banco de capacitores, o valor indicado na coluna S representa potência reativa capacitiva equivalente, empregada para a correção global do fator de potência do QGBT-IND para aproximadamente $\cos\phi = 0{,}95$.

Nota

Banco de capacitores: Em instalações industriais, a presença de motores, transformadores e outras cargas indutivas torna necessária a correção do fator de potência. O banco de capacitores atua como uma fonte local de energia reativa, compensando o atraso introduzido por essas cargas. Com isso, reduz a circulação de reativo na rede, melhora o aproveitamento dos condutores, diminui quedas de tensão e perdas por efeito Joule, além de evitar penalidades por excedente de reativo aplicadas pela concessionária.

Saiba Mais

Grupo eletrógeno: Termo técnico dicionarizado em português, também encontrado como grupo eletrogêneo e, de modo mais usual em catálogos e projetos, grupo gerador. Trata-se de um sistema formado por uma máquina motriz, frequentemente um motor de combustão interna, e um gerador elétrico, usualmente síncrono. No ambiente industrial, atua como fonte alternativa, redundante ou de emergência, garantindo a alimentação de cargas críticas, ou de toda a instalação quando assim dimensionado, em caso de falha ou interrupção no fornecimento da concessionária.

Nesta etapa, o grupo eletrógeno não é tratado como fonte de alimentação da instalação, mas sim como uma carga. A linha QGE-AUX representa exclusivamente os circuitos auxiliares necessários para mantê-lo em estado de prontidão (*standby*), o que inclui o carregador de baterias (CAR-GE), a resistência de pré-aquecimento (RES-GE) e o quadro de transferência automática (QTA-GE), responsável pelo comando e pela supervisão de tensão. A representação do grupo eletrógeno como fonte alternativa de energia, incluindo seu disjuntor termomagnético principal de proteção, será detalhada no diagrama unifilar apresentado posteriormente neste capítulo.

As distâncias indicadas na coluna Δl foram estimadas a partir da separação física alimentador-carga. Assim, os valores adotados representam comprimentos aproximados dos alimentadores e circuitos, considerando cerca de $20\,[\mathrm{m}]$ entre a entrada de alimentação e o QGBT, $30\,[\mathrm{m}]$ entre o QGBT e os quadros secundários, e $40\,[\mathrm{m}]$ ou mais entre os quadros secundários e os circuitos terminais. A coluna $\mathrm{f}_{s|c}$ reúne, conforme o caso, o fator de simultaneidade ou o fator de ciclo de serviço. As correntes $I_{B,R}$, $I_{B,S}$ e $I_{B,T}$ foram distribuídas por fase para permitir a leitura do carregamento do sistema trifásico.

Com base nos parâmetros sintetizados na Tabela 13.1, foi elaborado o diagrama unifilar simplificado da instalação industrial, apresentado na Figura 13.3. A representação organiza a instalação a partir do QGBT-IND, evidencia a distribuição dos quadros funcionais e dos circuitos terminais, e indica de forma compacta as seções dos condutores, os dispositivos de proteção, o DPS instalado no quadro geral e a distinção entre alimentadores, cargas efetivas, banco de capacitores, reserva técnica e cargas auxiliares associadas ao grupo eletrógeno.

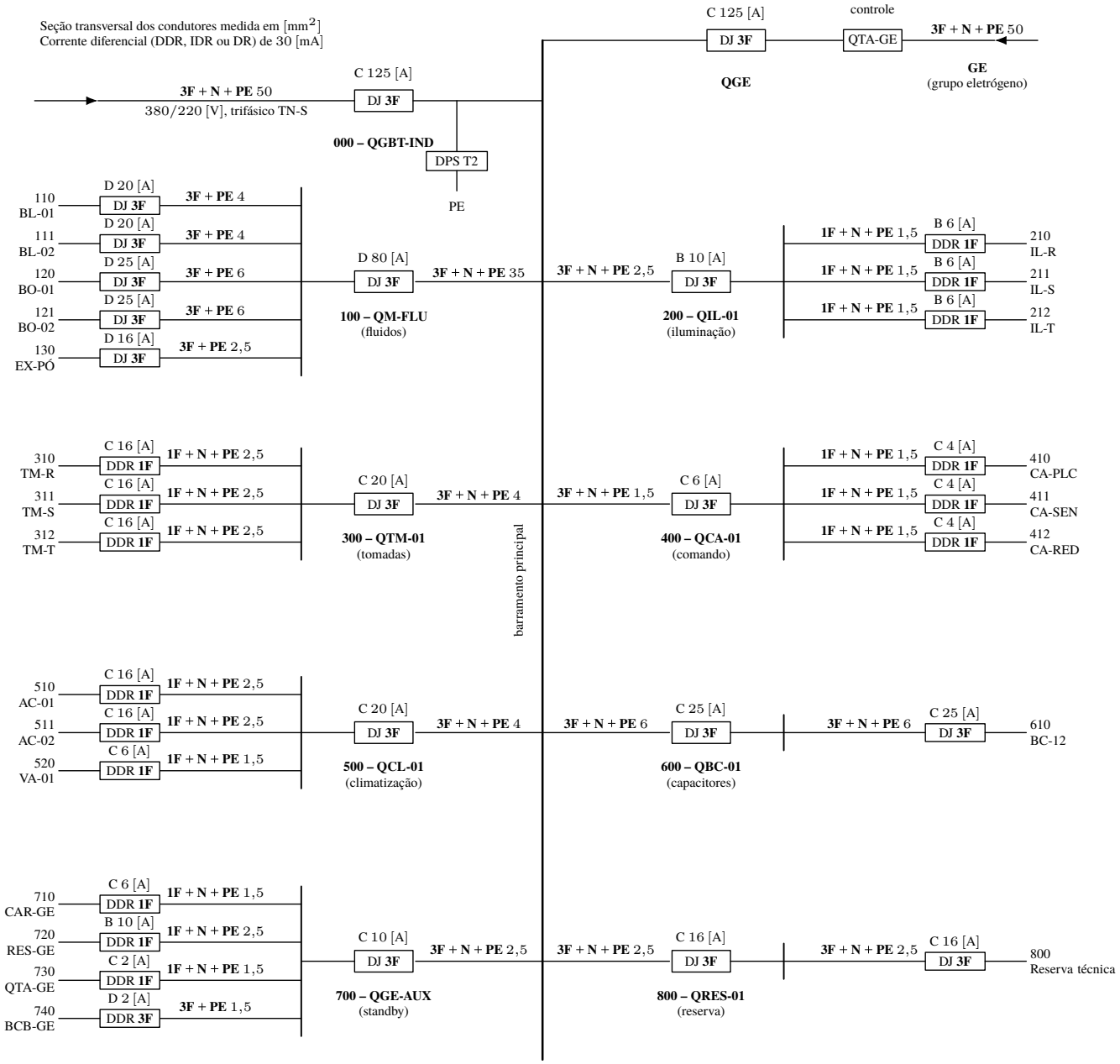

Figura 13.3: Diagrama unifilar associado ao quadro de cargas apresentado na Tabela 13.1. A representação mostra a hierarquia elétrica da instalação, com grupo eletrógeno, banco de capacitores, quadros, alimentadores, circuitos terminais, dispositivos de proteção (DJ, DDR e DPS), e informações técnicas simplificadas.

13.2.6 Representação de motores

Os motores elétricos são cargas muito comuns em instalações industriais e exigem atenção especial no diagrama unifilar. Conforme discutido no Capítulo 5, motores apresentam corrente de partida, fator de potência e comportamento transitório diferentes de cargas puramente resistivas. Por isso, sua representação deve indicar não apenas o circuito de alimentação, mas também os dispositivos de proteção, manobra e sobrecarga envolvidos.

Convém observar que a Figura 13.3 cumpre a função de mostrar a hierarquia elétrica da instalação industrial, com quadros, alimentadores, circuitos terminais e dispositivos de proteção de forma simplificada. Entretanto, se for demandada maior precisão na representação dos ramais motrizes, essa figura não está completa em termos de componentes. No quadro QM-FLU, cada motor foi representado apenas com o respectivo disjuntor do circuito terminal; porém, uma representação mais detalhada deve incluir também dois componentes adicionais entre o disjuntor e o motor: o contator de potência e o relé térmico de sobrecarga. Esses elementos tornam explícitas, no próprio diagrama, as funções de manobra e proteção específica do motor.

Em um diagrama unifilar mais detalhado, um motor trifásico pode ser representado por uma derivação contendo:

- **Disjuntor de proteção do circuito**, responsável principalmente pela proteção do alimentador e dos condutores contra curto-circuitos e sobrecorrentes de alta intensidade;
- **Contator de potência**, quando houver comando eletromecânico, utilizado para ligar/desligar o circuito de potência por meio de comando elétrico. O contator, por si só, não exerce função de proteção;
- **Relé térmico**, ou proteção eletrônica equivalente, quando aplicável, ajustado conforme a corrente nominal do motor e destinado à proteção contra sobrecargas prolongadas, falta de fase ou desequilíbrio, dependendo do modelo. Em geral, sua atuação ocorre sobre o circuito de comando, provocando a abertura do contator.

Embora possa existir alguma sobreposição entre a atuação térmica do disjuntor e a atuação do relé térmico na região de sobrecarga, suas finalidades não são idênticas. Em uma coordenação adequada, espera-se que o relé térmico atue antes do disjuntor em uma sobrecarga típica do motor, enquanto o disjuntor deve atuar principalmente em faltas mais severas, como curto-circuitos.

A Figura 13.4 representa os cinco ramais motrizes do quadro QM-FLU. Nela, cada circuito é mostrado com disjuntor, contator, relé térmico e motor, evidenciando os componentes adicionais que foram omitidos na representação simplificada da Figura 13.3.

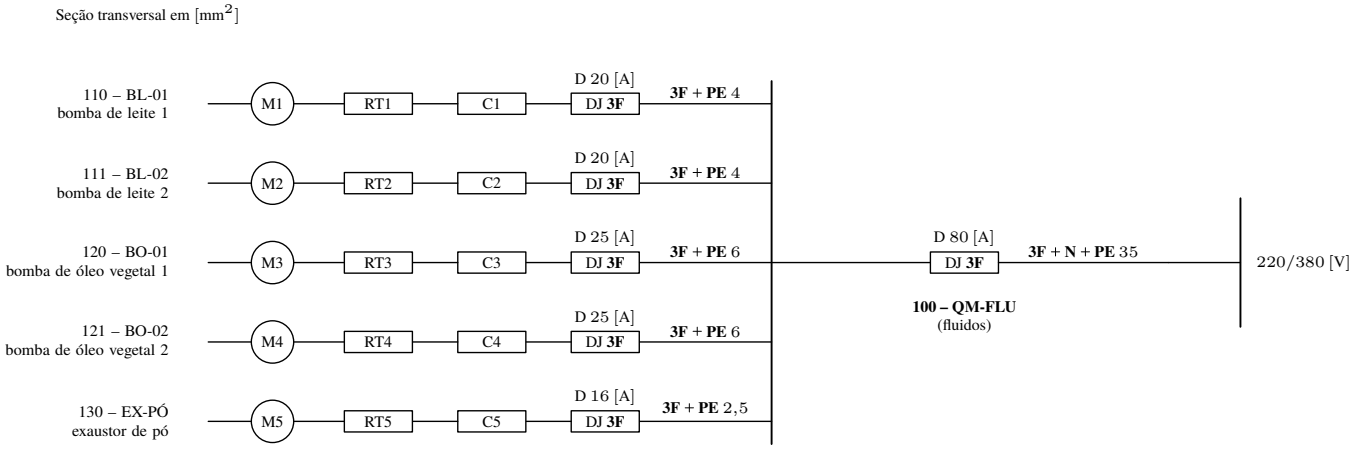

Figura 13.4: Representação unifilar detalhada dos ramais de motores do quadro QM-FLU, com indicação de disjuntores (DJ), contatores (C), relés térmicos (RT) e motores (M).

Aviso

Disjuntor-motor: Quando se utiliza um disjuntor-motor, ou outro dispositivo específico de proteção de motores, a função de proteção térmica ajustável pode estar incorporada ao próprio equipamento. Nesses casos, o disjuntor-motor pode substituir o relé térmico em determinadas configurações.

Quando o motor for acionado por variador de frequência, a representação deve indicar a presença deste dispositivo entre a proteção e o motor. Nesse caso, a proteção, o aterramento, os cabos, a compatibilidade eletromagnética e as orientações do fabricante passam a ter importância adicional. Para este livro, será suficiente reconhecer que o dispositivo de controle deve aparecer como equipamento intermediário no diagrama, e não como simples disjuntor.

Nota

Diagrama de potência e comando: O diagrama unifilar representa O diagrama unifilar representa principalmente a alimentação de potência e sua topologia. Já o circuito de comando, estudado e projetado no âmbito da automação, pode incluir contatores auxiliares, botoeiras, sensores, intertravamentos e relés. Por esse motivo, sua representação completa pode exigir diagramas funcionais ou multifilares complementares.

Em circuitos de iluminação e tomadas, a representação unifilar geralmente é mais simples. Em circuitos de motores, entretanto, pode ser necessário indicar também dispositivos de manobra, proteção e partida, como contator, relé térmico, partida direta, partida estrela-triângulo, *soft-starter* ou inversor de frequência. O nível de detalhamento depende do objetivo do diagrama. Em muitos projetos, o diagrama unifilar apresenta apenas a alimentação de potência e a hierarquia das cargas, enquanto o circuito de comando é desenvolvido em diagramas específicos.

Importante

Proteção: Não se deve representar uma carga diretamente ligada ao barramento sem o dispositivo de proteção correspondente. Mesmo em esquemas simplificados, o diagrama deve deixar claro qual dispositivo protege cada alimentador ou circuito terminal.

13.2.7 Checklist de revisão do diagrama unifilar

Antes de considerar o diagrama unifilar concluído, recomenda-se realizar uma revisão sistemática. O checklist a seguir pode ser aplicado ao projeto-base deste capítulo e a projetos semelhantes:

- Todos os circuitos do quadro de cargas aparecem no diagrama?
- A identificação dos circuitos é a mesma no quadro de cargas e no diagrama?
- Cada alimentador possui dispositivo de proteção indicado?
- Cada circuito terminal possui proteção antes da carga?
- As seções dos condutores foram indicadas?
- A presença de neutro e eletrodo de proteção está clara?
- Os motores possuem indicação de partida, manobra ou proteção complementar quando necessário?
- A diferença de potencial elétrico de alimentação foi informada?
- As saídas reservas estão identificadas como reservas?
- O diagrama está legível, sem cruzamentos desnecessários e sem excesso de texto?

! Importante

Revisão final: Um diagrama unifilar tecnicamente correto deve ser coerente com o quadro de cargas, com o memorial de cálculo, com as seções dos condutores e com os dispositivos de proteção. A qualidade do desenho não substitui a consistência técnica entre os documentos do projeto.

13.3 Resumo do capítulo

Neste capítulo, foi apresentado o diagrama unifilar como documento gráfico essencial para representar a estrutura elétrica de uma instalação de baixa tensão. Mostrou-se que ele não substitui o quadro de cargas nem o memorial de cálculo, mas organiza visualmente a relação entre alimentação, quadros, alimentadores, circuitos terminais, proteções, condutores e cargas. Dessa forma, o diagrama unifilar funciona como uma síntese gráfica das decisões de projeto, permitindo compreender a hierarquia elétrica da instalação e facilitando a comunicação entre projetistas, instaladores e responsáveis pela manutenção.

Discutiu-se que a representação unifilar utiliza uma única linha para representar conjuntos de condutores, desde que as informações de fases, neutro, condutor de proteção, seções, dispositivos de proteção e diferença de potencial elétrico sejam indicadas de forma clara. Também foram apresentados elementos comuns desse tipo de diagrama, como fontes de alimentação, quadros, barramentos, disjuntores, DPS, DR ou DDR, contatores, relés, motores, cargas terminais e reservas técnicas. Ressaltou-se ainda que a simbologia pode variar conforme normas, softwares, fabricantes e convenções de projeto, sendo indispensável manter legenda e coerência documental.

A relação entre quadro de cargas (tabela que detalha as informações técnicas dos componentes dos circuitos do sistema) e diagrama unifilar foi exemplificada inicialmente com o caso residencial desenvolvido nos capítulos anteriores, evidenciando a hierarquia entre QGBT, quadros secundários, alimentadores e circuitos terminais. Nesse exemplo, foram destacadas a representação de dispositivos de proteção, a indicação das seções dos condutores, a identificação dos circuitos e a distinção entre circuitos efetivamente projetados, circuitos temporários e reservas técnicas.

Em seguida, apresentou-se um projeto-base industrial independente composto por QGBT-IND, quadros funcionais, motores trifásicos, cargas auxiliares e circuitos de reserva, além de banco de capacitores e grupo eletrógeno — abordados aqui como cargas funcionais e fontes alternativas, sem o detalhamento de seus dimensionamentos. Esse exemplo demonstrou como o diagrama unifilar se torna mais robusto em cenários industriais, ambiente no qual se concentram motores, quadros especializados, sistemas de correção do fator de potência, fontes de energia redundantes e circuitos de comando e supervisão.

Por fim, destacou-se que a representação simplificada do diagrama unifilar nem sempre é suficiente para descrever circuitos que envolvem motores de médio ou grande porte, chaves de partida, relés térmicos, inversores de frequência, *soft-starters* ou circuitos de comando. O exemplo dos ramais motrizes do QM-FLU mostrou que, além do disjuntor, a representação detalhada deve explicitar os dispositivos responsáveis pela manobra e pela proteção do motor, como o contator e o relé de sobrecarga. Assim, conclui-se que a qualidade do diagrama não depende apenas da legibilidade gráfica, mas também da coerência técnica com o quadro de cargas, o memorial de cálculo, o dimensionamento dos condutores e a parametrização das proteções.

Capítulo 14

Diagrama multifilar e balanceamento

14.1 Introdução

O diagrama multifilar complementa a abordagem sintética do diagrama unifilar estudado no Capítulo 13. Enquanto este último apresenta a hierarquia elétrica de forma condensada, o modelo multifilar detalha individualmente todos os condutores que compõem os circuitos, separando graficamente as fases, o neutro e o condutor de proteção. Com isso, a representação deixa de indicar apenas "por onde a energia passa" para evidenciar "quais condutores participam de cada ligação", o que permite visualizar com maior precisão o padrão das conexões e das derivações.

Neste capítulo, será abordado o desenvolvimento do diagrama **multifilar**, termo adotado por descrever, de forma geral, qualquer representação na qual os condutores são desenhados individualmente. Dentro desse escopo, o diagrama trifilar surge como um caso particular amplamente aplicado em instalações trifásicas de baixa tensão; nele, as três fases são abertas graficamente e, quando aplicável, acompanhadas pelo condutor neutro **N** e de proteção **PE**. Essa distinção conceitual é fundamental, pois a instalação engloba circuitos com diferentes quantidades de condutores ativos, tais como circuitos monofásicos, bifásicos, trifásicos sem neutro e sistemas auxiliares de comando, todos cobertos pela lógica abrangente do modelo multifilar.

Os fundamentos dos sistemas monofásicos e trifásicos foram apresentados no Capítulo 3; o cálculo de corrente foi desenvolvido no Capítulo 4; a organização do quadro de cargas e o balanceamento preliminar foram tratados no Capítulo 9; e a estrutura unifilar dos exemplos residencial e industrial foi consolidada no Capítulo 13. Por isso, este capítulo não repete esses desenvolvimentos. O foco passa a ser a leitura gráfica das ligações e a conferência documental entre quadro de cargas, diagrama unifilar e diagrama multifilar.

Definição

Diagrama multifilar: O diagrama multifilar é a representação elétrica na qual os condutores de um circuito são traçados individualmente, distinguindo fases, neutro e condutor de proteção (**PE**). Ele permite identificar com maior precisão dispositivos de proteção, elementos de manobra, interligações, ramais e cargas atendidas. Diferentemente do diagrama unifilar, que reúne vários condutores em um único traço simbólico com anotações, o multifilar explicita a composição elétrica das conexões. Por legibilidade, podem ser omitidas repetições evidentes, agrupamentos simétricos ou circuitos idênticos sem informação adicional relevante. Em sistemas trifásicos, quando as três fases são representadas explicitamente, essa configuração também pode ser chamada de "diagrama trifilar".

O objetivo deste capítulo consiste em apresentar o diagrama multifilar como ferramenta de conferência das conexões elétricas e do balanceamento entre fases. Para isso, são discutidos os critérios de leitura dos condutores, a relação com o quadro de cargas, a presença do neutro, a coerência com o diagrama unifilar e, por fim, as versões multifilares dos exemplos residencial e industrial já organizados no Capítulo 13.

14.2 Desenvolvimento teórico

14.2.1 Do unifilar ao multifilar

A passagem do diagrama unifilar para o diagrama multifilar não modifica o circuito projetado, mas altera o grau de detalhamento da representação gráfica. No diagrama unifilar, uma única linha pode sintetizar um conjunto de condutores, desde que a anotação indique sua composição e a seção nominal correspondente. No diagrama multifilar, esses condutores passam a ser representados separadamente, permitindo identificar visualmente quais fases, neutro e condutor de proteção chegam a cada quadro, dispositivo ou carga.

O quadro de cargas informa numericamente a distribuição de fases, mas o multifilar permite verificar se essa distribuição foi transferida corretamente para o desenho. Assim, o diagrama multifilar funciona como uma leitura expandida do unifilar, com informações refatoradas, não como um novo dimensionamento.

A nomenclatura adotada designa as fases como **R**, **S** e **T**, o neutro como **N** e o condutor de proteção como **PE**. Essa padronização evita a alternância entre convenções comuns na literatura, como $\{A, B, C\}$, $\{U, V, W\}$, ou $\{L_1, L_2, L_3\}$, e mantém coerência com os quadros de cargas, as equações e os diagramas já apresentados.

14.2.2 Leitura dos condutores no diagrama multifilar

No diagrama multifilar, cada condutor possui uma função clara. As fases alimentam as cargas e conduzem corrente ativa do circuito; o neutro estabelece o retorno em circuitos fase-neutro e pode conduzir a corrente resultante do desequilíbrio; e o condutor de proteção não participa da alimentação normal da carga, pois sua função é criar um caminho seguro para correntes de falta e manter massas metálicas equipotencializadas.

A interpretação adotada neste capítulo para a leitura didática dos condutores nos diagramas multifilares está organizada a seguir. Ela não substitui a simbologia normativa, mas estabelece a leitura usada nos exemplos.

1. **R, S e T** — São os condutores de fase do sistema trifásico. Conforme o padrão gráfico adotado neste livro, são representados pelas cores vermelho, roxo/lilás e azul, respectivamente. A seção transversal dos condutores é indicada numericamente e, quando conveniente para a leitura do desenho, também pode ser sugerida visualmente pela espessura da linha. Esses condutores podem alimentar circuitos monofásicos, bifásicos ou trifásicos, de acordo com a distribuição registrada no quadro de cargas.
2. **N**: É o condutor neutro. Deve ser representado nos circuitos que utilizam alimentação fase-neutro ou que exigem neutro funcional. Não deve ser desenhado automaticamente em circuitos que não o utilizam. Entretanto, em quadros e alimentadores, pode ser previsto barramento de neutro mesmo quando ele não é empregado por todas as cargas, permitindo conexões auxiliares, intervenções de manutenção ou futuras ampliações da instalação. No padrão gráfico deste livro, o neutro é representado pela cor cyan ou azul-claro.
3. **PE**: É o condutor de proteção. Deve acompanhar os circuitos conforme o esquema de aterramento adotado e os critérios já discutidos no Capítulo 6 e na Seção 11.2.7. No padrão gráfico deste livro, é representado pela cor verde. Evita-se o uso de amarelo ou verde-amarelo na figura para reduzir ambiguidades com sinais de comando, identificação visual ou outros elementos gráficos do diagrama.
4. **Barramento**: É o ponto comum de distribuição dentro do quadro. Permite identificar a origem dos ramais e separar visualmente fases, neutro e proteção. Para evitar ambiguidade na leitura, os barramentos dos diagramas multifilares deste livro são representados como conjuntos de condutores paralelos, mantendo a separação cromática entre **R**, **S**, **T**, **N** e **PE**. Entretanto, essa representação não define a solução física completa dos barramentos ou condutores dentro de cada quadro. Conforme o caso, o trecho representado por condutores paralelos pode corresponder a um barramento propriamente dito, a cabos em eletroduto, canaleta, shaft ou outro percurso de instalação. Neste contexto, o objetivo do diagrama multifilar é organizar a conectividade elétrica do circuito, e não determinar a posição física final de montagem dos componentes.

A leitura multifilar deve evitar dois erros opostos:

- O primeiro é omitir condutores necessários, como o neutro em um circuito fase-neutro, ou condutores de manobra que sejam fundamentais.
- O segundo é desenhar condutores inexistentes, por exemplo, incluir neutro em um motor trifásico que não o utiliza. Em ambos os casos, o desenho deixa de corresponder ao circuito real e pode induzir erros de montagem, manutenção ou inspeção.

Aviso

Condutor desenhado é condutor previsto: Em um diagrama multifilar, desenhar um condutor significa afirmar que ele faz parte daquele circuito. Por isso, não se deve incluir neutro, fase ou condutor de proteção apenas para completar visualmente o desenho. Cada linha deve corresponder a uma função elétrica real e a uma decisão registrada no projeto.

14.2.3 Relação com o quadro de cargas e com o diagrama unifilar

O diagrama multifilar deve ser construído a partir dos documentos já consolidados. No estudo de caso residencial, a base de leitura é formada pelo quadro de cargas, pelo dimensionamento e pela verificação final apresentados nas Tabelas 11.5 e 12.1. A hierarquia gráfica correspondente foi sintetizada no diagrama unifilar da Figura 13.2. No exemplo industrial, a base é a Tabela 13.1, associada ao diagrama unifilar da Figura 13.3.

Portanto, o multifilar não deve introduzir novos nomes de circuito, novas potências, novos disjuntores ou novas seções de condutores. Sua função é abrir graficamente os condutores que já estavam indicados no unifilar e confirmar a distribuição de fases informada no quadro de cargas.

Importante

Ordem de construção: Na sequência do projeto, o quadro de cargas organiza os dados, o memorial de cálculo justifica correntes e seções, o diagrama unifilar apresenta a hierarquia elétrica e o multifilar explicita as conexões. Alterações no multifilar devem retornar aos documentos anteriores, não permanecer apenas no desenho.

A conferência documental pode ser feita circuito por circuito. Para cada ramal representado no multifilar, deve-se verificar se a identificação é a mesma do quadro de cargas, se a proteção coincide com o unifilar, se a seção dos condutores corresponde à verificação final e se as fases desenhadas são exatamente as atribuídas ao circuito.

14.2.4 Balanceamento como conferência gráfica

O balanceamento de fases foi introduzido na Seção 9.2.4, na qual a diferença entre a maior e a menor corrente de fase foi representada pela Equação 9.4. Neste capítulo, esse conceito é retomado apenas como conferência gráfica: o diagrama multifilar permite verificar se os circuitos monofásicos e bifásicos foram efetivamente distribuídos.

Em uma instalação com muitos circuitos, a simples inspeção visual não substitui o cálculo. Entretanto, ela ajuda a identificar padrões inadequados, como concentração de vários circuitos fase-neutro em uma única fase, uso recorrente do mesmo par de fases em cargas bifásicas ou distribuição pouco clara de reservas técnicas. Assim, a diagramação com paradigma multifilar funciona como um instrumento de revisão antes da execução.

Cargas trifásicas equilibradas, como motores adequadamente alimentados, distribuem-se pelas três fases. Por isso, o balanceamento costuma depender mais da distribuição dos circuitos monofásicos e bifásicos. Essa observação, já aplicada ao exemplo residencial do Capítulo 9, permanece válida na leitura gráfica deste capítulo.

14.2.5 Neutro, desequilíbrio e cargas não lineares

A função do neutro foi discutida no Capítulo 3 e sua presença nos esquemas de aterramento foi retomada no Capítulo 6. No diagrama multifilar, o neutro deve ser lido como um condutor funcional: ele aparece quando a carga ou o circuito precisa de referência fase-neutro, quando há alimentação de cargas monofásicas derivadas do sistema trifásico ou quando o equipamento exige essa ligação.

Em um sistema trifásico equilibrado, as correntes das fases se cancelam vetorialmente no ponto comum. Em uma instalação desbalanceada, essa soma deixa de ser nula, e o condutor neutro pode conduzir uma corrente resultante. Para a convenção adotada neste livro, a relação fasorial pode ser escrita como:

$$\vec{I}_{\mathbf{N}} = -\left(\vec{I}_{\mathbf{R}} + \vec{I}_{\mathbf{S}} + \vec{I}_{\mathbf{T}}\right). \tag{14.1}$$

A Equação 14.1 não representa uma soma aritmética simples. As correntes de fase são grandezas fasoriais e, portanto, a corrente no neutro depende da composição vetorial entre elas. Para utilizar apenas as magnitudes apresentadas no quadro de cargas, isto é, $I_{B,\mathbf{R}}$, $I_{B,\mathbf{S}}$ e $I_{B,\mathbf{T}}$, admite-se, como aproximação didática, um sistema trifásico senoidal em que as correntes fundamentais das fases estejam defasadas de $120°$. Assim, pode-se escrever:

$$\vec{I}_{\mathbf{R}} = I_{B,\mathbf{R}}\angle 0°, \qquad \vec{I}_{\mathbf{S}} = I_{B,\mathbf{S}}\angle -120°, \qquad \vec{I}_{\mathbf{T}} = I_{B,\mathbf{T}}\angle +120°. \tag{14.2}$$

Como o sinal negativo da Equação 14.1 não altera o módulo da corrente, tem-se:

$$I_{\mathbf{N}} = \left|\vec{I}_{\mathbf{R}} + \vec{I}_{\mathbf{S}} + \vec{I}_{\mathbf{T}}\right|. \tag{14.3}$$

Elevando essa expressão ao quadrado, obtém-se a soma dos quadrados dos módulos mais os termos de produto entre fasores. Como o ângulo entre duas fases quaisquer é $120°$, aparece o fator $\cos 120° = -1/2$:

$$I_{\mathbf{N}}^2 = I_{B,\mathbf{R}}^2 + I_{B,\mathbf{S}}^2 + I_{B,\mathbf{T}}^2 + 2I_{B,\mathbf{R}}I_{B,\mathbf{S}}\cos 120° + 2I_{B,\mathbf{S}}I_{B,\mathbf{T}}\cos 120° + 2I_{B,\mathbf{T}}I_{B,\mathbf{R}}\cos 120°. \tag{14.4}$$

Substituindo $\cos 120° = -1/2$, resulta:

$$I_{\mathbf{N}} = \sqrt{I_{B,\mathbf{R}}^2 + I_{B,\mathbf{S}}^2 + I_{B,\mathbf{T}}^2 - I_{B,\mathbf{R}}I_{B,\mathbf{S}} - I_{B,\mathbf{S}}I_{B,\mathbf{T}} - I_{B,\mathbf{T}}I_{B,\mathbf{R}}}. \tag{14.5}$$

Essa expressão permite relacionar a leitura gráfica do balanceamento com os valores tabulados no quadro de cargas. Em estudos iniciais, a comparação entre $I_{B,\mathbf{R}}$, $I_{B,\mathbf{S}}$ e $I_{B,\mathbf{T}}$ já fornece uma indicação prática do desbalanceamento. Em instalações com muitas cargas eletrônicas, contudo, também se deve considerar o efeito de componentes harmônicas, conforme os critérios de dimensionamento e correção tratados no Capítulo 11.

14.2.6 Versão multifilar do exemplo residencial

A Figura 14.1 apresenta a versão multifilar simplificada do exemplo residencial cuja organização unifilar foi mostrada na Figura 13.2. O objetivo não é repetir os cálculos das Tabelas 11.5 e 12.1, mas explicitar graficamente os condutores dos alimentadores e dos circuitos terminais, permitindo conferir a distribuição das fases. Neste exemplo, são utilizados símbolos próximos aos componentes físicos para indicar, de forma didática, a conexão do DPS trifásico no QGBT, dos DDRs ou disjuntores quando aplicáveis, e dos barramentos de neutro e de proteção. Diferentemente da versão unifilar, a representação multifilar oferece uma leitura mais detalhada das interligações e sugere, sem definir de modo executivo, uma possível organização física dos componentes no quadro.

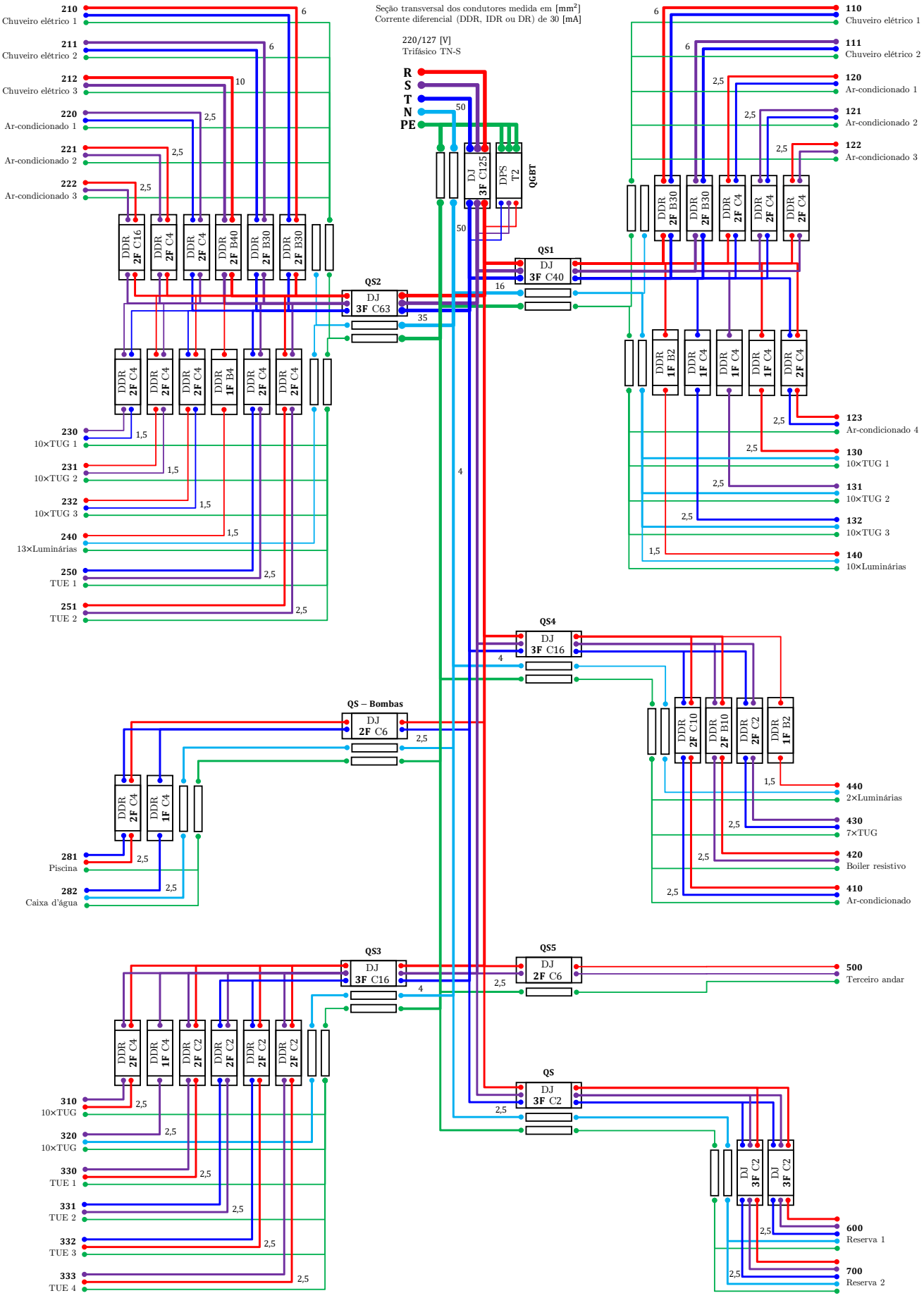

Figura 14.1: Diagrama multifilar simplificado associado ao exemplo residencial da Figura 13.2.

Na leitura da Figura 14.1, o QGBT deve ser entendido como o ponto de origem dos barramentos internos do exemplo residencial. A partir dele, os quadros secundários e os circuitos terminais são alimentados com a composição de condutores indicada. A figura, porém, não deve ser interpretada como planta de montagem física. O agrupamento dos disjuntores dos quadros secundários não informa se eles estão no mesmo quadro do disjuntor principal e do DPS, ou em quadros fisicamente separados. Essa distinção pertence à organização construtiva da instalação e aos diagramas elétricos da planta. Na documentação de cálculo, uma indicação auxiliar aparece na coluna (Δl), que representa o percurso elétrico aproximado de cada trecho, informação não codificada no diagrama trifilar.

Também se observa que o condutor de proteção **PE** acompanha os alimentadores e os circuitos terminais, chegando às cargas representadas. Essa continuidade é coerente com a lógica de proteção e aterramento adotada no projeto. No entanto, o diagrama multifilar não especifica todos os pontos físicos de conexão ao sistema de aterramento, como hastes, placas, malhas ou estruturas dedicadas. Ele explicita a presença e a continuidade funcional do condutor de proteção, mas não substitui o detalhamento construtivo do aterramento.

O condutor neutro **N**, por sua vez, não deve ser interpretado como condutor disponível para qualquer circuito. Ele aparece nos circuitos que utilizam alimentação fase-neutro ou que exigem neutro funcional. Nos quadros secundários, pode ser previsto barramento de neutro mesmo quando nem todas as cargas o utilizam, permitindo conexões auxiliares, intervenções de manutenção ou ampliações futuras devidamente projetadas. Essa previsão não autoriza derivações improvisadas nem o uso do neutro como fase reserva.

Em diagramas multifilares mais completos, também seria possível indicar as correntes nominais previstas em cada trecho. Na versão apresentada, essa informação foi omitida para preservar a legibilidade, pois os valores de corrente, as seções dos condutores e os dispositivos de proteção já foram definidos nas Tabelas 11.5 e 12.1. Assim, o papel da figura é complementar o quadro de cargas, e não repetir integralmente seus dados.

A presença dos dispositivos DDR no diagrama deve ser lida como indicação funcional da proteção diferencial residual. Na prática, essa proteção pode ser implementada por um dispositivo DDR dedicado, por um conjunto formado por disjuntor termomagnético e dispositivo DR, ou por dispositivo equivalente que atenda às características exigidas pelo projeto. Quando a proteção diferencial residual não for aplicável ao circuito considerado, permanece a necessidade do disjuntor termomagnético correspondente, dimensionado conforme os critérios já apresentados.

Nota

Exemplo residencial: A leitura multifilar serve para conferir a continuidade das fases, o neutro, a proteção, os circuitos terminais, quadros secundários e reservas. Valores de corrente, dispositivos de proteção e seções dos condutores não são recalculados aqui; eles devem ser importados das Tabelas 11.5 e 12.1.

Quando a Figura 14.1 é comparada com a Figura 13.2, deve-se observar que ambas representam a mesma instalação. A diferença é documental: o unifilar favorece a leitura da hierarquia entre QGBT, quadros secundários e cargas; o multifilar favorece a leitura dos condutores efetivamente associados a cada ramal. A vantagem pedagógica dessa representação é permitir que o estudante confira, em um único desenho, a coerência entre distribuição de fases, continuidade do neutro, presença do condutor de proteção e proteção indicada para cada trecho.

14.2.7 Versão multifilar do exemplo industrial

A Figura 14.2 apresenta a versão multifilar simplificada do exemplo industrial, cuja base de cálculo foi consolidada na Tabela 13.1 e cuja hierarquia unifilar aparece na Figura 13.3. A figura não repete o quadro de cargas; converte a informação tabular e unifilar em uma leitura gráfica dos condutores, destacando quadros funcionais, ramais motrizes, circuitos auxiliares e reservas. O desenho mostra a conexão do gerador ao dispositivo de transferência automática, comandado pelo circuito auxiliar, associado ao QGE-AUX. Também representa o banco de capacitores como conjunto expansível de unidades monofásicas, com controlador incorporado ao próprio conjunto. Por fim, indica conexões auxiliares destinadas a manutenção, expansão ou redundância operacional.

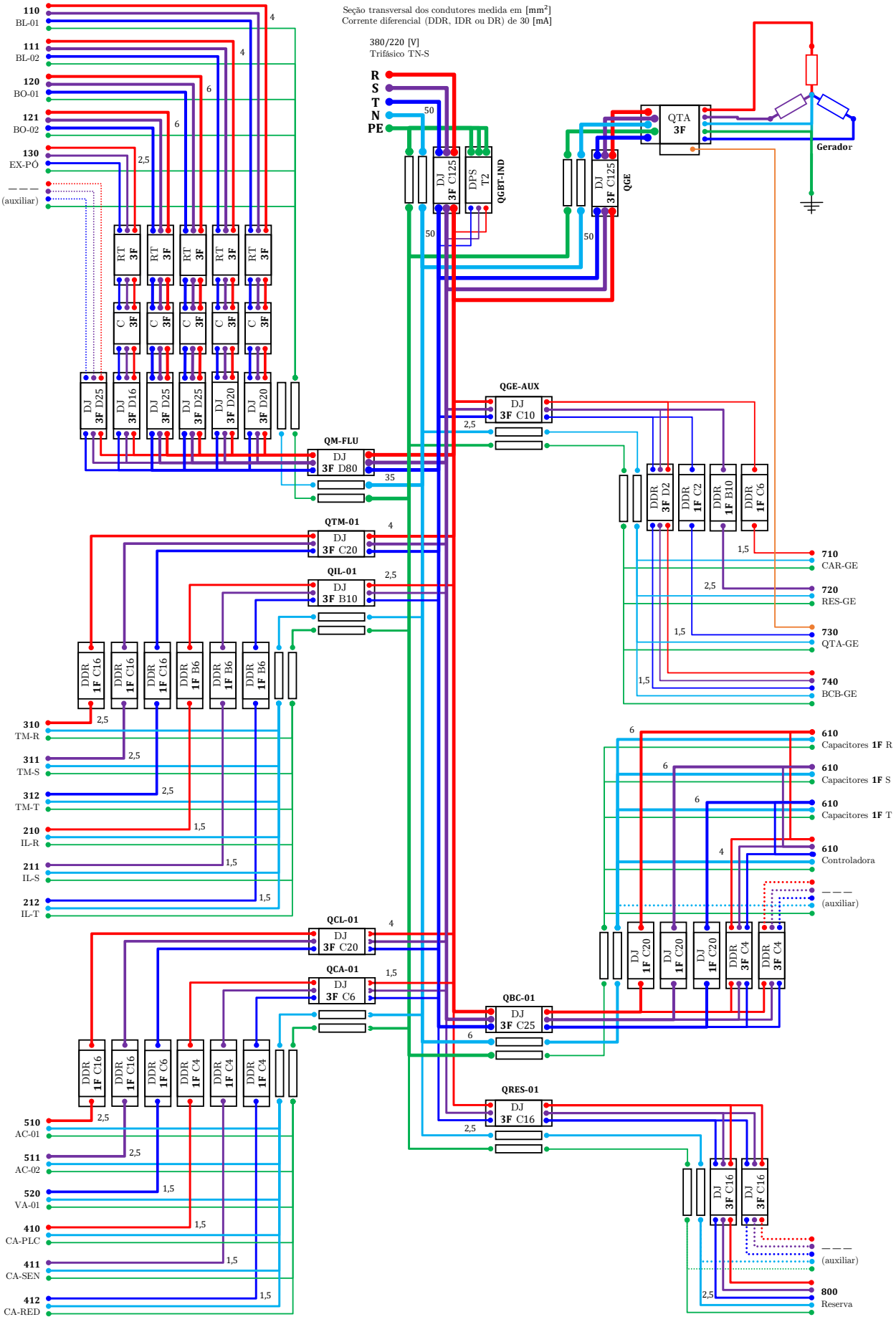

Figura 14.2: Diagrama multifilar simplificado associado ao exemplo industrial da Figura 13.3

Neste exemplo industrial, a leitura multifilar é mais rica porque reúne quadros funcionais, motores trifásicos, circuitos de comando, iluminação, tomadas de manutenção, climatização, banco de capacitores e cargas auxiliares associadas ao grupo eletrógeno. O quadro QM-FLU, por exemplo, concentra cargas motrizes e de exaustão; por isso, seus ramais são representados como circuitos trifásicos de força, mantendo coerência com a discussão sobre motores do Capítulo 5 e com o detalhamento do ramal motriz apresentado na Figura 13.4.

O banco de capacitores QBC-01 deve ser interpretado como parte da topologia elétrica da instalação industrial, e não como uma carga comum. Sua presença foi justificada no Capítulo 13, em função da correção global do fator de potência. Embora o quadro de cargas não detalhe as conexões internas desse conjunto, o diagrama multifilar explicita seus elementos principais, como as unidades capacitivas e a controladora. A proteção e a alimentação permanecem vinculadas ao barramento do QGBT-IND, conforme a organização prevista para o circuito de compensação reativa.

A presença do QGE-AUX também merece atenção. Como discutido na Subseção 13.2.5, esse quadro representa cargas auxiliares associadas ao grupo eletrógeno em condição de prontidão, como carregamento de baterias, pré-aquecimento, supervisão e sinais relacionados ao quadro de transferência automática. A conexão de comando indicada entre esse setor e o dispositivo de acionamento do gerador sugere a existência de uma lógica de partida, supervisão ou intertravamento, cujo detalhamento depende do equipamento utilizado. O objetivo didático do diagrama é mostrar que o gerador não se resume aos condutores de potência: ele também exige circuitos auxiliares e sinais de controle. No multifilar, essas cargas aparecem como circuitos alimentados e protegidos, sem serem confundidas com a fonte alternativa principal da instalação.

Aviso

Fonte alternativa e cargas auxiliares: Ao representar um grupo eletrógeno, deve-se distinguir a fonte de energia alternativa dos circuitos auxiliares necessários para mantê-la operacional. No exemplo deste livro, QGE-AUX representa cargas auxiliares para manter o gerador em configuração de *standby*; a representação da transferência de fonte deve permanecer coerente com o diagrama unifilar industrial e com os critérios de proteção correspondentes.

A comparação entre as Figuras 13.3 e 14.2 permite observar a diferença de finalidade entre os documentos. O unifilar organiza a instalação industrial por blocos funcionais e dispositivos principais; o multifilar mostra como os barramentos e condutores se distribuem. Em instalações reais, essa segunda leitura é especialmente útil para montagem de painéis, identificação de bornes, revisão de fases, comissionamento e manutenção.

14.2.8 Procedimento de revisão do diagrama multifilar

Antes de considerar o diagrama multifilar concluído, recomenda-se realizar uma revisão sistemática. Essa revisão deve ser feita depois da conferência do quadro de cargas e do diagrama unifilar, pois o multifilar depende diretamente desses documentos. Um procedimento prático pode ser organizado da seguinte forma:

1. Conferir se todos os circuitos do diagrama unifilar aparecem no multifilar;
2. Verificar se cada circuito mantém a mesma identificação adotada no quadro de cargas;
3. Confirmar se as fases desenhadas correspondem às fases indicadas na tabela técnica;
4. Confirmar se o condutor de proteção acompanha os circuitos conforme o esquema de aterramento adotado;
5. Revisar se cada carga possui dispositivo de proteção antes do ramal terminal;
6. Conferir se as seções indicadas são compatíveis com as tabelas de dimensionamento e verificação;
7. Observar visualmente a distribuição de cargas entre **R**, **S** e **T**;
8. Atualizar o quadro de cargas e o diagrama unifilar caso alguma alteração seja necessária.

Esse procedimento reforça que o diagrama multifilar não é apenas uma ilustração, mas um documento técnico de conferência. Quando bem elaborado, reduz ambiguidades entre projeto e execução, ajuda a localizar erros de faseamento, evidencia condutores omitidos e facilita a identificação de neutro e proteção.

14.3 Resumo do capítulo

Neste capítulo, o diagrama multifilar foi apresentado como uma representação complementar ao diagrama unifilar estudado no Capítulo 13. Enquanto o unifilar sintetiza a hierarquia elétrica da instalação, o multifilar explicita individualmente os condutores de fase, neutro e proteção, permitindo verificar quais condutores participam de cada ligação. Nesse contexto, o diagrama trifilar foi tratado como um caso particular do modelo multifilar, aplicado a circuitos trifásicos nos quais as fases são abertas graficamente.

Foram discutidos os critérios de leitura dos condutores **R**, **S**, **T**, **N** e **PE**, bem como a função dos barramentos nos quadros elétricos. Destacou-se que cada linha desenhada no multifilar deve corresponder a uma função elétrica real do circuito, evitando tanto a omissão de condutores necessários quanto a inclusão de condutores inexistentes. Também foi reforçado que o multifilar organiza a conectividade elétrica, mas não substitui a planta de montagem física, o detalhamento construtivo dos quadros ou a documentação executiva da instalação.

O capítulo também relacionou o diagrama multifilar com o quadro de cargas, o memorial de cálculo e o diagrama unifilar. O multifilar não introduz novos circuitos, proteções ou seções de condutores; sua função é abrir graficamente informações já consolidadas nos documentos anteriores. Por isso, alterações feitas no multifilar devem retornar ao quadro de cargas, ao dimensionamento e ao unifilar, preservando a coerência documental do projeto.

Em relação ao balanceamento, mostrou-se que o diagrama multifilar permite conferir graficamente a distribuição dos circuitos entre as fases **R**, **S** e **T**. Essa conferência não substitui o cálculo, mas ajuda a identificar visualmente concentrações indevidas de cargas monofásicas ou bifásicas em uma mesma fase. A presença do neutro foi analisada a partir da soma vetorial das correntes de fase, resultando em uma expressão didática para estimar o módulo da corrente de neutro em sistemas trifásicos senoidais com defasagem de $(120°)$. Também se destacou que cargas não lineares e componentes harmônicas podem exigir atenção adicional no dimensionamento do neutro.

Por fim, foram apresentadas as versões multifilares simplificadas dos exemplos residencial e industrial. No exemplo residencial, a Figura 14.1 permitiu conferir a distribuição das fases, a presença do neutro, a continuidade do condutor de proteção, os dispositivos DDR ou DR e a relação entre QGBT, quadros secundários e circuitos terminais. No exemplo industrial, a Figura 14.2 mostrou uma leitura mais ampla, envolvendo quadros funcionais, ramais motrizes, banco de capacitores, cargas auxiliares do grupo eletrógeno, reservas e circuitos de comando.

Conclui-se que o diagrama multifilar é um documento técnico de conferência, comunicação e revisão. Quando bem elaborado, ele reduz ambiguidades entre projeto e execução, evidencia erros de faseamento, auxilia na identificação de neutro e proteção, melhora a rastreabilidade das decisões de projeto e contribui para a montagem, inspeção, comissionamento e manutenção de instalações elétricas de baixa tensão.

Capítulo 15

Ferramentas computacionais aplicadas

15.1 Introdução

A elaboração de projetos eletroeletrônicos em ambiente digital tornou-se parte do trabalho técnico contemporâneo. Softwares de desenho, plataformas de projeto, ambientes integrados, planilhas, recursos de automação e assistentes baseados em inteligência artificial auxiliam na organização, representação, revisão e emissão da documentação. No entanto, nenhuma ferramenta substitui o domínio técnico do projetista. O programa acelera o processo, padroniza folhas e reduz retrabalho, mas a responsabilidade pela coerência do projeto permanece com quem interpreta, calcula, dimensiona e revisa a instalação (IEEE, 2007; ABNT NBR 5410, 2004).

Nos capítulos anteriores, foram desenvolvidas as etapas essenciais do projeto: interpretação de planta, levantamento de cargas, quadro de cargas, demanda, dimensionamento, proteção e diagramas unifilar e multifilar. Este capítulo não as repete; orienta a escolha e o uso de ferramentas computacionais conforme ensino, orçamento, complexidade, colaboração e finalidade profissional.

A escolha de uma ferramenta não deve ser tratada como preferência pessoal ou propaganda de um produto. Cada alternativa atende melhor a determinados contextos. Uma ferramenta livre pode ser excelente para aprendizagem e documentação esquemática; uma plataforma predial pode facilitar projetos residenciais e comerciais; um sistema CAD elétrico ou ECAD pode ser mais adequado para painéis, comandos e automação industrial; um ambiente integrado BIM pode ser necessário quando há compatibilização entre disciplinas; e uma ferramenta EDA pode ser indispensável quando o trabalho envolve circuitos eletrônicos, placas de circuito impresso ou simulação.

Nota

BIM: Ambiente integrado digital de modelagem e documentação no qual os elementos do projeto não são apenas desenhos, mas objetos com informações associadas (*Building Information Modeling*) . Em vez de representar apenas linhas e símbolos, o BIM permite relacionar componentes, dimensões, materiais, interferências e documentos, favorecendo a compatibilização entre disciplinas como arquitetura, elétrica, hidráulica, climatização e estrutura.

Nota

EDA: Software usado no desenvolvimento de circuitos eletrônicos. Ela auxilia na criação de esquemas elétricos, simulação de circuitos, projeto de placas de circuito impresso, organização de componentes, verificação de conexões e geração de arquivos para fabricação. Diferentemente de ferramentas voltadas a instalações elétricas prediais ou industriais, as ferramentas EDA (*Electronic Design Automation*) são aplicadas principalmente em eletrônica, automação embarcada, prototipagem, eletrônica de potência e desenvolvimento de hardware.

15.2 Desenvolvimento teórico

15.2.1 O papel das ferramentas no projeto

O ambiente computacional participa de várias etapas do projeto. Ele pode auxiliar na criação de desenhos, no preenchimento de quadros, na organização de folhas, na identificação de circuitos, na simulação de circuitos eletrônicos, na geração de listas, na emissão de arquivos portáteis (e.g.: `.pdf`) e no controle de revisões. Também pode automatizar verificações, desde que o projetista compreenda os critérios usados pelo programa.

Definição

Ferramenta computacional de projeto: É qualquer recurso digital utilizado para calcular, representar, simular, organizar, revisar, compatibilizar ou emitir documentos técnicos de um projeto elétrico ou eletroeletrônico.

O estudante deve evitar dois extremos: tratar o software como prancheta eletrônica, usando-o apenas para desenhar linhas e símbolos sem vínculo com o quadro de cargas; ou confiar cegamente em resultados automáticos sem compreender as hipóteses adotadas. Em ambos os casos, o projeto perde confiabilidade.

A boa prática consiste em usar o software como extensão do raciocínio técnico. Os dados entram no ambiente digital a partir do levantamento de cargas, do quadro de cargas, dos cálculos e das decisões de dimensionamento. Em seguida, são representados em diagramas, plantas, modelos, listas e documentos exportados. Por fim, o conjunto deve ser revisado para confirmar se cálculo, desenho e documentação permanecem coerentes.

Nota

CAD e ECAD: Sigle para (*Computer-Aided Design*), que é o conjunto de ferramentas computacionais usadas para desenhar, modelar e documentar projetos técnicos, como plantas, detalhes construtivos, esquemas e modelos tridimensionais. ECAD (*Electrical Computer-Aided Design*) é uma aplicação mais específica do CAD voltada a projetos elétricos e eletroeletrônicos, incluindo diagramas, painéis, comandos, cabeamento, bornes, listas de componentes e documentação associada. Em resumo, o CAD é uma categoria ampla de desenho e projeto assistido por computador; o ECAD é sua especialização para sistemas elétricos.

Saiba Mais

MEP e plugins MEP: Sigla para *Mechanical, Electrical and Plumbing*, expressão usada em ambientes BIM para representar as disciplinas de instalações mecânicas, elétricas e hidrossanitárias. Em um projeto predial, isso inclui sistemas como climatização, elétrica, iluminação, telecomunicações, hidráulica, esgoto, combate a incêndio e outros subsistemas técnicos. Plugins MEP são extensões instaladas em softwares BIM ou CAD para ampliar seus recursos nessas áreas, permitindo, por exemplo, lançar eletrodutos, dimensionar circuitos, verificar interferências, gerar quantitativos e integrar a documentação elétrica ao modelo arquitetônico.

15.2.2 Categorias de ferramentas

As ferramentas disponíveis podem ser agrupadas conforme sua função principal. A lista a seguir deve ser lida como orientação geral, não como relação definitiva de ferramentas.

- **Planilhas e automação** — Úteis em praticamente qualquer projeto, mas exigem validação das fórmulas, versões e critérios adotados.
  - **Exemplos:** LibreOffice Calc, Google Sheets, Excel, Python e scripts auxiliares.
  - **Uso:** quadros de cargas, listas aninhadas, conferências, cálculos auxiliares e relatórios.

- **CAD 2D geral** — Ferramentas flexíveis, porém dependem de padronização manual de camadas, blocos, símbolos e folhas. A condição de gratuidade ou licença deve ser verificada antes da adoção.
  - **Exemplos:** AutoCAD, LibreCAD, nanoCAD, ZWCAD, GstarCAD, DraftSight e similares.
  - **Uso:** plantas, detalhes, esquemas simples e documentação gráfica em duas dimensões.
- **Diagramação elétrica** — Para ensino e documentação esquemática, principalmente quando o foco é clareza do circuito e acesso a uma ferramenta livre (QElectroTech Team, 2024).
  - **Exemplos:** QElectroTech e ferramentas semelhantes.
  - **Uso:** diagramas unifilares, multifilares, esquemas de comando, folhas elétricas e simbologia.
- **Plataformas prediais e sistemas guiados** — Podem aumentar a produtividade, mas dependem de escopo disponível, modelo de licença, conexão, exportação de arquivos e conferência normativa. Algumas operam em navegador; outras podem usar instalação local ou modelo híbrido.
  - **Exemplos:** Woca, Fase Delta e soluções equivalentes.
  - **Uso:** projetos residenciais, comerciais ou prediais com recursos guiados, bibliotecas e cálculos.
- **CAD elétrico e ECAD** — Padronização e automação documental, mas exigem treinamento, licença e bibliotecas organizadas. Alguns fornecedores já incorporam módulos de IA ou integração direta com fabricação.
  - **Exemplos:** AutoCAD Electrical, EPLAN Electric P8, SOLIDWORKS Electrical e similares.
  - **Uso:** painéis elétricos, comandos, automação, listas de componentes, bornes, cabos e documentação industrial.
- **BIM e MEP** — Convenientes em projetos com várias disciplinas e equipes, mas possuem maior curva de aprendizagem e exigem padronização colaborativa.
  - **Exemplos:** Revit, AltoQi Builder, plugins MEP e plataformas compatíveis.
  - **Uso:** modelagem integrada, compatibilização entre disciplinas, quantitativos e documentação coordenada.
- **EDA e simulação eletrônica** — Indispensáveis quando o projeto envolve circuitos eletrônicos. Não substituem ferramentas de instalações prediais ou industriais; complementam o fluxo eletroeletrônico.
  - **Exemplos:** KiCad, EasyEDA, Altium Designer, OrCAD, LTspice, QUCS, Proteus e similares.
  - **Uso:** captura esquemática, simulação, projeto de placas de circuito impresso, eletrônica de potência e hardware embarcado.
- **LLM** — Aceleram etapas iniciais, mas podem ocultar hipóteses, aplicar critérios inadequados ou produzir resultados normativamente incorretos. Exigem auditoria humana rigorosa.
  - **Exemplos:** assistentes de IA, plugins para CAD/BIM/EDA, rotas automáticas e LLMs corporativos.
  - **Uso:** geração de rascunhos, sugestões de layout, roteamento, pré-dimensionamento, extração de listas e conferências preliminares.
- **Nuvem, CDE e colaboração** — Úteis em equipes e projetos maiores. Exigem política de permissões, cópias locais, exportação periódica e atenção ao aprisionamento tecnológico.
  - **Exemplos:** Autodesk Docs, Trimble Connect, AltoQi Visus Collab, OneDrive, Google Drive, Git e repositórios equivalentes.
  - **Uso:** centralização de documentos, versionamento, comentários, compatibilização e controle de acesso.

Nota

Lista expansível: Novas ferramentas podem ser acrescentadas à lista sem alterar a lógica do capítulo. Para isso, basta identificar a categoria, o uso principal, as vantagens, as limitações e os cuidados necessários.

15.2.3 Inteligência artificial e design generativo

O avanço recente de assistentes de IA, algoritmos de design generativo e automações integradas a CAD, BIM, ECAD e EDA alterou o modo como alguns projetos são iniciados. Esses recursos podem sugerir rotas de eletrodutos, organizar circuitos preliminares, gerar listas de materiais, propor balanceamento de fases, interpretar escopos em texto ou acelerar a modelagem de sistemas elétricos. Em eletrônica, também surgem fluxos capazes de auxiliar na seleção de componentes, leitura de folhas de dados e conferência inicial de conexões.

Essa capacidade, entretanto, não elimina a necessidade de projeto. A inteligência artificial, especialmente quando baseada em modelos de linguagem de grande porte, ou LLMs (*Large Language Models*), opera a partir de dados disponíveis, regras configuradas, modelos matemáticos e padrões estatísticos. Quando os critérios adotados não são visíveis, configuráveis ou auditáveis, o risco técnico aumenta. Uma sugestão automática pode parecer correta, mas empregar fator de agrupamento inadequado, omitir a queda de potencial elétrico, ignorar o método de instalação, confundir circuito terminal com alimentador ou aplicar requisito normativo fora de contexto.

Aviso

O risco dos assistentes de IA: Ferramentas de IA não possuem responsabilidade técnica. Elas podem gerar respostas plausíveis, mas incorretas, incluindo dimensionamentos, listas, rotas, símbolos ou justificativas normativas. Todo resultado assistido por IA deve ser conferido com os critérios da ABNT NBR 5410, com o memorial de cálculo e com as decisões documentadas pelo projetista (ABNT NBR 5410, 2004).

Em contexto didático, a IA deve ser usada como apoio para revisão, organização, comparação e geração de rascunhos, nunca como fonte única de decisão. O estudante deve ser capaz de explicar por que determinado condutor foi escolhido, por que uma proteção foi adotada, por que uma fase recebeu determinada carga e por que a representação gráfica corresponde ao projeto calculado.

15.2.4 Critérios para escolher a ferramenta

Não existe uma "ferramenta completa", mas aquela "mais compatível com um projeto em determinado contexto". Essa compatibilidade depende do objetivo da atividade, do tipo de instalação, do orçamento, da experiência da equipe, dos documentos exigidos, da integração com outras disciplinas e da rastreabilidade desejada.

Os critérios a seguir ajudam a orientar essa escolha.

- **Escopo do projeto:** a ferramenta deve ser compatível com a natureza do trabalho. Projetos didáticos, residenciais, prediais, industriais, eletrônicos ou multidisciplinares exigem diferentes níveis de cálculo, representação, documentação e integração. Em atividades simples, planilhas e diagramação básica podem bastar; em projetos complexos, pode ser necessário recorrer a CAD elétrico, plataformas prediais, BIM ou EDA.
- **Tipo de documento:** a escolha também depende dos documentos que precisam ser produzidos. Plantas, diagramas, memoriais, listas de materiais, modelos BIM, arquivos `.dxf` ou `.dwg`, relatórios de cálculo, placas de circuito impresso e arquivos de fabricação podem exigir ferramentas distintas. Em muitos casos, o fluxo de trabalho combina mais de um software.
- **Acesso e custo:** é necessário avaliar se a ferramenta é livre, gratuita, educacional, paga, online ou baseada em assinatura. Em cursos técnicos, o acesso fora do laboratório é um critério importante, pois o estudante precisa praticar sem depender exclusivamente da infraestrutura da instituição.
- **Curva de aprendizagem:** a ferramenta escolhida deve ser compatível com o tempo disponível e com a experiência da equipe. Um software avançado pode oferecer muitos recursos, mas tornar-se inadequado quando o objetivo é introdutório ou quando não há tempo suficiente para treinamento.
- **Padronização:** bons recursos de padronização reduzem ambiguidades entre projeto, execução e manutenção. Por isso, convém verificar se a ferramenta permite organizar símbolos, folhas, carimbos, etiquetas, revisões, bibliotecas, camadas e identificações de forma coerente.

- **Verificação normativa embutida:** algumas ferramentas realizam verificações automáticas de critérios normativos, como dimensionamento, quantidade mínima de pontos, queda de potencial elétrico ou seleção de dispositivos. Esses recursos podem ser úteis, mas precisam ser configuráveis, visíveis e auditáveis. O projetista deve compreender quais hipóteses foram aplicadas e conferir os resultados.
- **Interoperabilidade:** a capacidade de exportar e importar formatos abertos ou amplamente aceitos reduz o risco de aprisionamento tecnológico. Formatos como `.pdf`, `.dxf`, `.dwg`, `.ifc`, `.csv`, `.gbr` (Gerber) ou `.step` facilitam revisão, arquivamento, fabricação, compatibilização e migração futura entre ferramentas.
- **Integração:** em projetos profissionais e colaborativos, a ferramenta pode precisar se comunicar com outras disciplinas, planilhas, APIs, bancos de dados, bibliotecas de componentes, plataformas BIM ou sistemas de fabricação. Quanto maior a integração exigida, maior deve ser o cuidado na escolha do ambiente digital.
- **Dependência tecnológica:** é importante considerar se o uso da ferramenta depende de internet, servidor externo, assinatura, licença ativa ou formato proprietário. O cancelamento de assinatura, a indisponibilidade do serviço ou a descontinuação do software pode dificultar o acesso a projetos antigos.

! Importante

Escolha contextual: Não existe uma ferramenta universal. A alternativa mais adequada é aquela que atende ao escopo técnico, ao nível de formação, ao orçamento, ao prazo, à exigência documental e à possibilidade de auditoria.

15.2.5 Indicações por contexto de uso

A escolha da ferramenta também pode ser orientada pelo contexto de uso. Cada tipo de projeto exige recursos, níveis de integração e formas de documentação diferentes.

- **Atividades iniciais de formação:** em cursos introdutórios, convém priorizar planilhas (e.g.: LibreOffice Calc ou Google Sheets), softwares livres de diagramação e CAD 2D simples (e.g.: FreeCAD). Essas ferramentas permitem que o estudante pratique os fundamentos sem depender de infraestrutura complexa. Nesse contexto, o ponto central é compreender a relação entre quadro de cargas, condutores, proteção e representação gráfica, por isso devem ser preferidas ferramentas acessíveis e estáveis e fáceis de instalar.
- **Projetos residenciais, comerciais ou prediais de pequeno e médio porte:** nesses casos, plataformas especializadas (e.g.: Woca ou Fase Delta) e soluções equivalentes, podem acelerar a elaboração de plantas, circuitos, quadros e documentos de entrega. A escolha deve considerar o tipo de projeto aceito, os critérios de dimensionamento disponíveis, os formatos de exportação, a aderência às normas aplicáveis e o grau de dependência de nuvem ou assinatura. A produtividade oferecida pela ferramenta não elimina a necessidade de conferência técnica.
- **Projetos industriais:** quando há painéis, comandos, motores, bornes, intertravamentos, cabeamento e sistemas de automação, ferramentas de CAD elétrico ou ECAD tendem a ser mais adequadas. AutoCAD Electrical, EPLAN Electric P8, SOLIDWORKS Electrical e alternativas semelhantes oferecem recursos para documentação de componentes, listas, identificação de cabos, organização de bornes e padronização de esquemas. Em contrapartida, exigem treinamento, bibliotecas organizadas e licenças compatíveis com o ambiente de trabalho.
- **Projetos multidisciplinares:** quando o projeto exige integração entre arquitetura, elétrica, hidráulica, climatização, estrutura e outras disciplinas, ambientes BIM, como Revit, AltoQi Builder, plugins MEP e plataformas compatíveis, podem ser necessários. Esses recursos favorecem compatibilização espacial, modelo tridimensional e colaboração entre equipes, especialmente em projetos com controle documental compartilhado.
- **Projetos eletrônicos, automação embarcada e eletrônica de potência:** nesses contextos, ferramentas EDA e simuladores, como KiCad, EasyEDA, Altium Designer, OrCAD, LTspice, QUCS, Proteus e soluções equivalentes, são mais apropriados. Elas permitem desenvolver esquemáticos eletrônicos, simular circuitos, projetar placas de circuito impresso, organizar componentes e gerar arquivos de fabricação. KiCad e EasyEDA atendem bem a contextos didáticos e de prototipagem, enquanto Altium Designer, OrCAD e soluções equivalentes aparecem com frequência em ambientes profissionais.

15.2.6 Fluxo mínimo de trabalho digital

Independentemente do software adotado, o trabalho digital deve seguir uma sequência organizada e coerente com o fluxo geral do projeto, apresentado nas Figuras 1.1 e 8.2. A ordem das etapas pode variar conforme a ferramenta utilizada, mas o princípio permanece: consolidar os dados técnicos, representar ou simular o projeto, revisar os resultados e emitir a documentação final. Isto é:

1. Reunir planta, levantamento de cargas, quadro de cargas, memorial de cálculo ou especificação eletrônica;
2. Escolher a ferramenta conforme o tipo de documento a produzir;
3. Configurar folha, carimbo, legenda, unidades, bibliotecas e padrão de identificação;
4. Inserir quadros, cargas, condutores, proteção, componentes eletrônicos ou demais elementos do projeto;
5. Manter a mesma nomenclatura usada nos demais documentos;
6. Conferir se o desenho, o modelo ou a simulação correspondem aos cálculos e aos dados de origem;
7. Gerar arquivos de entrega, como `.pdf`, `.dxf`, `.dwg`, `.ifc`, `.csv` ou outros formatos exigidos;
8. Registrar revisão, data, autor, versão dos arquivos emitidos e, se aplicável, histórico de alterações.

Definição

Rastreabilidade digital: É a capacidade de identificar qual versão do arquivo gerou determinado documento, quem alterou o quê, quando a alteração ocorreu e quais dados técnicos justificam cada representação do projeto.

A organização dos arquivos é parte do processo técnico. Em projetos pequenos, uma estrutura local de pastas pode ser suficiente. Em projetos maiores, ambientes comuns de dados, conhecidos como CDE, podem centralizar modelos, desenhos, memoriais, comentários e revisões. Sistemas como Autodesk Docs, Trimble Connect, plataformas BIM colaborativas, repositórios Git e serviços de armazenamento com histórico de versões podem apoiar esse controle, desde que haja política clara de permissões, nomenclatura e emissão.

Nota

CDE e colaboração: CDE é a sigla para *Common Data Environment*, ou ambiente comum de dados. Trata-se de um espaço digital organizado para centralizar, controlar e compartilhar informações do projeto entre diferentes participantes. Um CDE não é apenas uma pasta compartilhada: ele deve permitir identificar versões, responsáveis, permissões, comentários, documentos emitidos e documentos ainda em desenvolvimento.

15.2.7 Interoperabilidade, arquivos abertos e versionamento

A durabilidade de um projeto digital depende da possibilidade de abrir, revisar e reaproveitar seus arquivos no futuro. Por isso, a escolha da ferramenta deve considerar não apenas os recursos de desenho ou cálculo, mas também os formatos de exportação. Arquivos em `.pdf` facilitam leitura, emissão e arquivamento; `.dxf` e `.dwg` favorecem troca entre ferramentas CAD; `.ifc` apoia fluxos BIM; `.csv` facilita tratamento de tabelas.

Importante

Portabilidade : Sempre que possível, o projeto deve possuir uma versão editável e uma versão de arquivamento. Isso reduz a dependência de um único fornecedor, de uma assinatura ativa ou de uma versão específica do software.

O versionamento também deve ser compatível com o tipo de arquivo. Git e plataformas semelhantes funcionam muito bem para textos, scripts, arquivos LaTeX, planilhas simples exportadas como `.csv` e documentação de configuração. Para arquivos binários grandes, como modelos BIM, desenhos proprietários e pacotes de fabricação, pode ser necessário combinar repositório, CDE, armazenamento em nuvem e regras formais de emissão.

15.2.8 Automação e scripts

Além dos programas gráficos, o projetista pode automatizar tarefas repetitivas com planilhas, scripts e APIs. Essa automação pode gerar quadros de cargas, conferir nomes de circuitos, preencher listas de materiais, extrair dados de desenhos, comparar revisões ou produzir relatórios. Em Python, bibliotecas como `openpyxl` manipulam planilhas, enquanto `ezdxf` lê ou gera arquivos `.dxf`. Em BIM, recursos como Dynamo para Revit permitem automatizar rotinas paramétricas e verificações específicas.

15.2.9 Boas práticas e tendências

A qualidade do documento digital depende tanto da ferramenta quanto da organização do usuário. Um desenho produzido em software pode ser confuso se houver excesso de informação, símbolos desalinhados, identificação inconsistente ou ausência de revisão. Entre as boas práticas recomendadas, destacam-se:

- Manter coerência entre quadro de cargas, memorial, diagramas, modelos, simulações e listas;
- Padronizar nomes de circuitos, quadros, cargas, dispositivos e componentes;
- Evitar excesso de informações em uma única folha; usar legenda, carimbo, revisão e data de emissão;
- Guardar versões anteriores quando houver mudanças relevantes;
- Exportar periodicamente formatos de intercâmbio e arquivamento;
- Separar arquivos editáveis de arquivos exportados; conferir os documentos finais antes da entrega;
- Verificar periodicamente se a ferramenta adotada continua adequada ao curso ou ao mercado.

Algumas tendências podem ganhar importância em futuras edições do curso. Realidade aumentada, realidade virtual, gêmeos digitais e modelos de manutenção baseados em dados auxiliam na visualização de interferências, no treinamento de equipes e no acompanhamento da instalação. Em um curso introdutório, devem ser tratados como visão de futuro, sem substituir os fundamentos de cálculo, representação e documentação.

Nota

Atualização do capítulo: Como softwares mudam de versão, licença, recursos e modelo de negócio, este capítulo foi organizado de forma modular. Novas ferramentas podem ser incluídas em edições futuras sem alterar a ideia central: escolher o recurso digital conforme o escopo do projeto e validar tecnicamente seus resultados.

15.3 Resumo do capítulo

Neste capítulo, as ferramentas computacionais foram apresentadas como recursos de apoio ao projeto elétrico e eletroeletrônico, e não como substitutas do conhecimento técnico. Foram discutidas categorias de ferramentas, incluindo planilhas, automação, CAD 2D, diagramação elétrica, plataformas prediais, CAD elétrico industrial, ECAD, BIM, EDA, simulação eletrônica, IA e ambientes colaborativos em nuvem.

Também foram propostos critérios de escolha, considerando escopo, custo, acesso, curva de aprendizagem, padronização, verificação normativa, interoperabilidade, integração e dependência tecnológica. A comparação mostrou que cada ferramenta possui aplicação mais adequada: ensino, projetos prediais, documentação industrial, automação, compatibilização multidisciplinar, desenvolvimento eletrônico, colaboração ou emissão de documentos.

Por fim, foram apresentados um fluxo mínimo de trabalho digital, recomendações de organização de arquivos, critérios de portabilidade, exemplos de automação, uma lista de verificação e boas práticas de documentação. Conclui-se que a ferramenta mais conveniente é aquela que permite representar, revisar, auditar e emitir o projeto com clareza, rastreabilidade e coerência com os cálculos desenvolvidos nos capítulos anteriores.

Referências

ABB. **Electrical installation handbook: Protection, control and electrical devices**. 6. ed. Bergamo, 2010. Technical handbook for electrical installation design and protection devices. Citado na página 147.

ALEXANDER, C. K. e SADIKU, M. N. O. **Fundamentals of Electric Circuits**. 6. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2017. ISBN 978-0078028229. Citado nas páginas 11, 13, 29, 35.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5445: Símbolos gráficos para diagramas elétricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1988. Citado na página 147.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5444: Símbolos gráficos para instalações elétricas prediais**. Rio de Janeiro: ABNT, 1989. Citado na página 147.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5446: Símbolos gráficos de eletricidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 1989. Citado na página 147.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. Citado nas páginas 2, 3, 29, 35, 46, 54, 59, 62, 69, 98, 114, 133, 135, 164, 167.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14039: Instalações elétricas de média tensão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. Citado nas páginas 3, 54, 59.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13534: Instalações elétricas de baixa tensão – Requisitos específicos para instalação em estabelecimentos assistenciais de saúde**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. Citado na página 3.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15749: Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. Citado na página 3.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15751: Sistemas de aterramento de subestações – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. Citado na página 3.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 60947-2: Dispositivo de manobra e comando de baixa tensão – Parte 2: Disjuntores**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. Citado na página 3.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/CIE 8995-1: Iluminação de ambientes de trabalho – Parte 1: Interior**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. Citado na página 3.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16274: Sistemas fotovoltaicos conectados à rede – Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. Citado na página 3.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5419: Proteção contra descargas atmosféricas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. Citado nas páginas 54, 59.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 60079-14: Atmosferas explosivas – Parte 14: Projeto, seleção e montagem de instalações elétricas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. Citado na página 3.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 61439-1: Conjuntos de manobra e comando de baixa tensão – Parte 1: Regras gerais**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. Citado na página 3.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 61439-2: Conjuntos de manobra e comando de baixa tensão – Parte 2: Conjuntos de manobra e comando de potência**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. Citado na página 3.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16690: Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos – Requisitos de projeto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. Citado na página 3.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7117: Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. Citado nas páginas 3, 54, 59.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13570: Instalações elétricas em locais de afluência de público – Requisitos específicos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. Citado na página 3.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10898: Sistema de iluminação de emergência**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023. Citado na página 3.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5419-1: Proteção contra descargas atmosféricas – Parte 1: Princípios gerais**. Rio de Janeiro: ABNT, 2026. Citado na página 3.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5419-2: Proteção contra descargas atmosféricas – Parte 2: Análise de risco**. Rio de Janeiro: ABNT, 2026. Citado na página 3.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5419-3: Proteção contra descargas atmosféricas – Parte 3: Danos físicos a estruturas e perigos à vida**. Rio de Janeiro: ABNT, 2026. Citado na página 3.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5419-4: Proteção contra descargas atmosféricas – Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, 2026. Citado na página 3.

BOTELHO, M. H. C. e FIGUEIREDO, M. A. d. **Instalações elétricas residenciais básicas: para profissionais da construção civil**. São Paulo: Blucher, 2012. De acordo com a ABNT NBR 5410:2004. ISBN 978-85-212-0672-9. Citado na página 147.

CHAPMAN, S. J. **Electric Machinery Fundamentals**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2012. ISBN 978-0071086172. Citado nas páginas 2, 4, 6, 11, 20, 33, 38.

COTRIM, A. A. M. B. **Instalações Elétricas**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2020. ISBN 978-8543025216. Citado na página 98.

CREDER, H. **Instalações Elétricas**. 16. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. ISBN 978-8521631025. Citado na página 98.

CRESPO, A. **Instalações Elétricas**. Rio de Janeiro: LTC, 2015. Citado nas páginas 2, 62, 69.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 315: Graphic symbols for electrical and electronics diagrams, including reference designation letters**. New York: IEEE, 1975. Inactive-reserved standard; reaffirmed in 1993. Citado na página 147.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Recommended Practices for Industrial and Commercial Power Systems**. New York: IEEE, 2007. Citado nas páginas 2, 164.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61082-1: Preparation of documents used in electrotechnology – Part 1: Rules**. Geneva: IEC, 2014. Citado na página 147.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 81346-1: Industrial systems, installations and equipment and industrial products – Structuring principles and reference designations – Part 1: Basic rules**. Geneva: IEC, 2022. Citado na página 147.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60617 DB: Graphical symbols for diagrams**. Geneva: IEC, 2026. Online database; official source of IEC 60617. Citado na página 147.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14617-1: Graphical symbols for diagrams – Part 1: General rules**. Geneva: ISO, 2025. Citado na página 147.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. **NR-10: Segurança em instalações e serviços em eletricidade**. Brasília: Ministério do Trabalho, 2004. Citado nas páginas 2, 3, 54.

NILSSON, J. W. e RIEDEL, S. A. **Electric Circuits**. 11. ed. Harlow: Pearson, 2020. ISBN 978-1292261041. Citado nas páginas 11, 14, 29, 32.

QELECTROTECH TEAM. **QElectroTech: Graphical Editor for Electrical Diagrams User Manual**. s.l., 2024. `https://qelectrotech.org/`. Acesso em 17 jun. 2026. Citado nas páginas 147, 166.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Electrical Installation Guide**. Rueil-Malmaison, 2026. Online technical guide for low-voltage electrical installations in accordance with IEC standards. Acesso em 17 jun. 2026. Citado na página 147.

WEG. **Guia de seleção de partidas**. Jaraguá do Sul, 2024. Manual técnico para seleção de partidas e diagramas elétricos de aplicação. Citado na página 147.

WILDI, T. **Electrical Machines, Drives and Power Systems**. 6. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2006. ISBN 978-0131776913. Citado nas páginas 20, 35.

"Projeto Elétrico Industrial Básico" é uma obra didática voltada à formação em eletroeletrônica, com foco na elaboração de projetos elétricos industriais de baixa tensão. O livro apresenta uma abordagem progressiva, integrando sistemas eletroeletrônicos e seus fundamentos, levantamento e quadros de cargas, cálculo de demanda, dimensionamento de condutores e dispositivos de proteção.

A obra conduz o estudante desde os conceitos essenciais de potência elétrica, corrente alternada e cargas industriais até a organização completa de um projeto elétrico, incluindo diagramas unifilares e trifilares, balanceamento de fases, uso de ferramentas computacionais livres e documentação técnica.

Com ênfase em **segurança, normalização, cálculo aplicado e representação técnica**, cada capítulo foi estruturado para conectar teoria e prática, permitindo que o aluno compreenda não apenas os fundamentos, mas também sua aplicação em situações reais de projeto.

Destinado a estudantes técnicos, professores e profissionais em formação, este material fornece uma base sólida para projetos elétricos industriais básicos, preparando o leitor para elaborar, interpretar e documentar instalações com responsabilidade, clareza e rigor técnico.

Tópicos principais:

- Fundamentos do projeto elétrico industrial
- Grandezas elétricas e sistemas monofásicos e trifásicos
- Cálculo de correntes em circuitos industriais
- Cargas elétricas e motores de indução trifásicos
- Proteção elétrica e sistemas de aterramento
- Leitura de planta e organização do projeto
- Levantamento de cargas e quadro de distribuição
- Cálculo de demanda e balanceamento de fases
- Dimensionamento de condutores e dispositivos de proteção
- Diagramas elétricos, ferramentas computacionais e documentação técnica

Editora Argus Kepheus

COMPÊNDIO TÉCNICO PARA FORMAÇÃO PROFISSIONAL

ISBN: 978-65-976344-0-8
Edição: 1ª Edição
Formato: Digital
Páginas: 174
Figuras: 26
Tabelas: 29
Idioma: Português
Ano: 2026

Classificação: Eletrotécnica • Projeto Elétrico • Instalações Industriais

CIP: 621.3 (Engenharia Elétrica) • 621.31 (Instalações Elétricas) • 621.319 (Distribuição de Energia Elétrica) • 621.316 (Proteção de Instalações Elétricas) • 621.317 (Quadros e Equipamentos Elétricos)

contato@arguskepheus.com

www.arguskepheus.com

ISBN: 978-65-976344-0-8
CIP
9 786597 634408